



# **Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

**Facultad de Ciencias Físicas**

**Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos**

## **Análisis y determinación del potencial solar mediante modelos basados en parámetros climáticos para el distrito de San Mateo, provincia de Huarochirí, Lima – Perú**

### **TESIS**

**Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos**

### **AUTOR**

**Jhon Américo Rafael MENDOZA ANDÍA**

### **ASESOR**

**Dr. Lozano Pedro SÁNCHEZ CORTEZ**

**Lima, Perú**

**2021**



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Mendoza, J. (2021). *Análisis y determinación del potencial solar mediante modelos basados en parámetros climáticos para el distrito de San Mateo, provincia de Huarochirí, Lima – Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---

### Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Jhon Américo Rafael Mendoza Andía
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	45677036
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0002-7154-8247">https://orcid.org/0000-0002-7154-8247</a>
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Lozano Pedro Sánchez Cortez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10699870
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0001-6776-963X">https://orcid.org/0000-0001-6776-963X</a>
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Douglas Donal Sarango Julca
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07136313
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Miguel Ángel Astorayme Valenzuela
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	45516060
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Rolando Wilder Adriano Peña
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	41864353

Datos de investigación	
Línea de investigación	A.2.5.1. Energética
Grupo de investigación	Micha Yawaypita, Energía del Mañana - MYEM
Agencia de financiamiento	CONCYTEC-FONDECYT en el marco de la convocatoria EO41-01 [Contrato N°156-2018-FONDECYT-BM-IADT-AV] Proyecto de investigación titulado: Desarrollo e Implementación de Tecnologías Innovadoras con Energía Solar para incluir la Cadena Productiva de la Lana de Alpaca en las Comunidades del Distrito de San Mateo, Provincia de Huarochirí.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: San Mateo Centro poblado: Comunidad Campesina San Antonio U.P. Cashapata Latitud: -11.8552586 Longitud: -76.1532086
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2020
URL de disciplinas OCDE	Investigación climática <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.10">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.10</a> Ingeniería mecánica <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.01</a>



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
(Universidad del PERÚ, Decana de América)

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS**

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS EN LA MODALIDAD VIRTUAL  
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE  
FLUIDOS**

*Siendo las 18:00 horas del miércoles 17 de noviembre de 2021, en la Sala de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la Presidencia del Dr. Ing. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA (Presidente), Mg. Ing. MIGUEL ANGEL ASTORAYME VALENZUELA (Miembro), Mg. ROLANDO WILDER ADRIANO PEÑA (Miembro) y el Dr. Ing. LOZANO PEDRO SÁNCHEZ CORTEZ (Asesor), se dio inicio a la Sesión Pública Virtual de Sustentación de Tesis para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos mediante la Sustentación y aprobación de Tesis del Bachiller:*

**JHON AMÉRICO RAFAEL MENDOZA ANDÍA**

*El Presidente del Jurado en primer lugar dio lectura al documento formal que designa al Jurado y aprueba el acto de sustentación de la Tesis, así como del Resumen del Expediente e invitó al citado Bachiller a realizar la presentación y exposición de su Tesis titulada: "ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL SOLAR MEDIANTE MODELOS BASADOS EN PARÁMETROS CLIMÁTICOS PARA EL DISTRITO DE SAN MATEO, PROVINCIA DE HUAROCHIRÍ, LIMA - PERÚ".*

*Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente del Jurado con el apoyo de la Unidad de Informática, invitó al Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión Virtual, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.*

*Al término de la deliberación el Presidente de Jurado invitó al candidato y al público en general a pasar a la Sala de Sesión Virtual, para dar lectura al Acta de Calificación, en cuyo contenido se ha registrado la nota obtenida por el bachiller, la misma que ha sido de:*

16

Dieciséis

.....  
(NÚMERO)

.....  
(LETRAS)

*Habiendo concluido la Sustentación de la Tesis, el Presidente del Jurado remitirá el Acta al Vicedecano Académico de la Facultad de Ciencias Físicas, quien la suscribirá dando fe de la realización del acto virtual de manera remota.*

*El Acta de Calificación será remitida al Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, quien a su vez solicitará la aprobación del Consejo de Facultad para el otorgamiento del Título Profesional y su elevación al Consejo Universitario para conferir el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos al Bachiller JHON AMERICO RAFAEL MENDOZA ANDÍA.*





**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
(Universidad del PERÚ, Decana de América)

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS**

*Siendo las 19:45 horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose tres (03) Actas originales de la Sustentación de la Tesis.*

*Ciudad Universitaria, 17 de noviembre de 2021*

DR. ING. DOUGLAS D. SARANGO JULCA  
PRESIDENTE DEL JURADO

MG. ING. MIGUEL A. ASTORAYME VALENZUELA  
MIEMBRO DEL JURADO

MG. ROLANDO WILDER ADRIANO PEÑA  
MIEMBRO DEL JURADO

DR. LOZANO PEDRO SÁNCHEZ CORTEZ  
ASESOR



UNMSM

Firmado digitalmente por ROJAS  
ACUÑA Joel FAU-20148092282 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 09.12.2021 12:57:17 -05:00

**DR. JOEL ROJAS ACUÑA**  
**VICEDECANO ACADÉMICO (e) FCF**

**Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:**

<https://us06web.zoom.us/j/81121183237?pwd=OXMzdGtnNlZWUCtNWVRtbVRvTGZPQT09>

**ID de reunión: 811 2118 3237**

**Código de acceso: 934033**

**Grabación Archivada en: Google Meet**

**Dedicatoria**

A Dios y a mi familia, por el apoyo incondicional durante toda mi carrera.



### **Agradecimientos**

A mi asesor Dr. Ing. Lozano Pedro Sánchez Cortez por la guía y paciencia, a la jefa del proyecto Mg. Ing. Beatriz Luisa Salvador Gutiérrez por la confianza para realizar esta investigación y a los pobladores de la comunidad de Cashapata por la ayuda en los trabajos de campo.

Este trabajo fue financiado por el CONCYTEC-FONDECYT en el marco de la convocatoria EO41-01 [Contrato N°156-2018-FONDECYT-BM-IADT-AV] Proyecto de investigación titulado: Desarrollo e Implementación de Tecnologías Innovadoras con Energía Solar para incluir la Cadena Productiva de la Lana de Alpaca en las Comunidades del Distrito de San Mateo, Provincia de Huarochirí.



## Resumen

Este trabajo analiza un procedimiento para determinar el potencial solar mediante modelos de estimación de radiación solar basados en parámetros climáticos, aplicándolos a un nivel local donde no se cuenta con registros de medición. El estudio se realizó en el distrito de San Mateo, provincia de Huarochirí, en la sierra de la región Lima, Perú.

Se propuso la utilización de tres modelos de estimación como alternativas de cálculo basados en la temperatura del aire, ya que esta variable se mide en la gran mayoría de estaciones automáticas. El uso de estos modelos responde a la relación que guarda la temperatura con la radiación y su práctica aplicación incluyendo la atenuación por efectos atmosféricos. Los modelos utilizados fueron Bristow-Campbell, Hargreaves-Samani y Annandale, de los cuales se seleccionó el modelo Bristow-Campbell el cual mostró mejores resultados a comparación de sus semejantes, obteniendo un  $R^2$  de 0.818, RMSE de 1.14, MBE de 0.06 a diferencia de los  $R^2$  de 0.921 y 0.921, RMSE de 1.27 y 1.27, MBE de -0.52 y -0.52 de Hargreaves-Samani y Annandale respectivamente.

Para desarrollar los modelos se registró una serie temporal de 10 meses de una estación meteorológica automática propia, complementando la información con un registro de 9 años de data histórica extraídos de la aplicación gratuita de la NASA (POWER) para los puntos auxiliares de medición ubicados en todo el distrito. Se validaron los datos de la NASA correlacionándolos con los datos obtenidos en tierra dando resultados aceptables para su aplicación. Esto permitió generar una malla de registro de datos con los puntos de medición para así realizar la simulación en el software libre QGIS y obtener los mapas de distribución de la radiación. La radiación promedio anual fue de 5.26 kWh/m<sup>2</sup>/día, lo que resultó altamente rentable.

Se considera que la metodología desarrollada en esta investigación es aplicable para estimar la distribución de la radiación solar incidente a nivel local, considerando siempre las

condiciones del área de estudio. Los valores de radiación solar global producidos en esta tesis se pueden utilizar en el diseño y cálculo del rendimiento de las aplicaciones solares para el distrito de San Mateo.

## **Abstract**

This research analyzes a procedure in order to determine the solar potential through solar radiation estimation models based on climatic parameters, applying them at a local level where there are no measurement records. The study was carried out in the San Mateo district, Huarochirí province, in the highlands of the Lima region, Peru.

The use of three estimation models was proposed as calculation alternatives, based on air temperature, since this variable is measured in the vast majority of automatic stations. The use of these models responds to the relationship between temperature with the radiation and its practical application, including attenuation due to atmospheric effects. The models used were Bristow-Campbell, Hargreaves-Samani and Annandale, of which the Bristow-Campbell model was selected, which showed better results compared to its peers, obtaining an  $R^2$  of 0.818, RMSE of 1.14, MBE of 0.06 unlike of the  $R^2$  of 0.921 and 0.921, RMSE of 1.27 and 1.27, MBE of -0.52 and -0.52 of Hargreaves-Samani and Annandale respectively.

To develop the models, a 10-month time series was recorded from its own automatic weather station, complementing the information with a 9-year record of historical data extracted from the free NASA application (POWER) for the auxiliary measurement points located in the whole district. The NASA data were validated by correlating them with the data obtained on the ground, giving acceptable results for their application. This made it possible to generate a data log mesh with the measurement points in order to perform the simulation in the free QGIS software and obtain the radiation distribution maps. The annual average radiation was 5.26 kWh/m<sup>2</sup>day, which was highly profitable.

The methodology developed in this research is applicable to estimate the distribution of incident solar radiation at the local level, always considering the conditions of the study area. The global solar radiation values produced in this thesis can be used in the design and performance calculation of solar applications for the San Mateo district.

## Contenido

Capítulo 1: Aspectos Generales de la Investigación.....	1
1.1. Introducción .....	1
1.2. Planteamiento del Problema .....	3
1.2.1. Problema principal.....	4
1.2.2. Problemas específicos.....	4
1.3. Justificación e Importancia .....	5
1.4. Alcances y Limitaciones de la Investigación.....	6
1.5. Objetivos.....	6
1.5.1. Objetivo general.....	6
1.5.2. Objetivos específicos.....	6
1.6. Hipótesis .....	6
Capítulo 2: Marco Teórico.....	7
2.1. Antecedentes .....	7
2.1.1. Antecedentes nacionales.....	7
2.1.2. Antecedentes internacionales.....	9
2.2. Marco Conceptual.....	13
2.2.1. El sol y su aporte energético.....	13
2.2.2. Relación geométrica entre el sol y la tierra.....	16
2.2.3. Radiación solar.....	19
2.2.4. Radiación solar extraterrestre.....	21
2.2.5. Dirección del haz de radiación.....	22
2.2.6. Medición de la radiación solar.....	24
2.2.7. Atenuación de la radiación solar por efectos atmosféricos.....	29
2.2.8. Modelos de estimación.....	32
2.2.9. Método de interpolación .....	37
2.2.10. Rentabilidad del Potencial Solar.....	40
Capítulo 3: Marco Metodológico.....	42
3.1. Área de Estudio.....	42
3.1.1. Descripción.....	42
3.1.2. Localización.....	42
3.1.3. Accesibilidad.....	45
3.1.4. Clima.....	45

3.1.5. Población.....	46
3.1.6. Vivienda.....	46
3.2. Tipo, Nivel y Diseño de la Investigación.....	48
3.2.1. Tipo de investigación.....	48
3.2.2. Nivel de la investigación.....	49
3.2.3. Diseño de la investigación.....	49
3.3. Población y Muestra .....	49
3.4. Selección de la Muestra .....	49
3.5. Técnicas de Recolección de Datos.....	50
3.6. Análisis e Interpretación de la Información.....	50
3.6.1. Técnica de análisis de datos.....	50
3.7. Operacionalización de las Variables e Indicadores .....	52
3.7.1. Variable dependiente.....	52
3.7.2. Variable independiente.....	52
3.7.3. Indicadores.....	52
3.8. Instrumentos y Procesamiento .....	52
3.8.1. Estación meteorológica DAVIS.....	52
3.8.2. POWER Project data sets, NASA.....	55
Capítulo 4: Presentación de Resultados .....	56
4.1. Elaboración de Base de Datos.....	56
4.1.1. Registro de Estación Meteorológica Automática DAVIS.....	56
4.1.2. Registro de base de datos extraída de NASA.....	59
Capítulo 5: Discusión e Interpretación .....	68
5.1. Validación de Datos.....	68
5.1.1. Correlación de temperaturas.....	68
5.1.2. Correlación de la radiación.....	70
5.2. Aplicación de los Modelos de Estimación como Alternativas de Cálculo .....	71
5.2.1. Alternativa 1: Modelo Bristow-Campbell.....	72
5.2.2. Alternativa 2: Modelo Hargreaves-Samani.....	76
5.2.3. Alternativa 3: Modelo Annandale.....	81
5.3. Selección del Modelo de Estimación Adecuado para el Área de Estudio.....	85
5.4. Aplicación del Modelo de Estimación Seleccionado para los Puntos Auxiliares de Medición .....	88
5.4.1. Validación del Modelo Aplicado.....	91



5.5. Distribución Espacial y Temporal de la Radiación Solar Incidente en San Mateo .....	92
5.5.1. Distribución anual.....	93
5.5.2. Distribución mensual. ....	94
5.5.3. Distribución estacional.....	102
Capítulo 6: Conclusiones .....	104
6.1. Conclusión General.....	104
6.2. Conclusiones Específicas.....	104
Capítulo 7: Recomendaciones.....	106
Capítulo 8: Referencias Bibliográficas .....	107
Capítulo 9: Anexos .....	111
Anexo 1: Metodología del cálculo .....	111
Anexo 2: Glosario de términos .....	113
Anexo 3: Matriz de consistencia.....	115
Anexo 4: Plano de Ubicación .....	116

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1:</b> Día Juliano .....	18
<b>Tabla 2:</b> Métodos de interpolación espacial .....	38
<b>Tabla 3:</b> Distribución anual de la radiación solar incidente diaria promedio en el Perú. ....	40
<b>Tabla 4:</b> Media Anual de la Radiación Solar Diaria en el Lima. ....	41
<b>Tabla 5:</b> Media Anual de la Radiación Solar Diaria en el Lima. ....	41
<b>Tabla 6:</b> Puntos Auxiliares de Medición.....	42
<b>Tabla 7:</b> Población de San Mateo por edad .....	46
<b>Tabla 8:</b> Población de San Mateo por sexo.....	46
<b>Tabla 9:</b> Número de viviendas en San Mateo .....	48
<b>Tabla 10:</b> Tipo de vivienda en San Mateo .....	48
<b>Tabla 11:</b> Valores promedios mensuales por año de la temperatura, periodo 2010 – 2019...61	
<b>Tabla 12:</b> Valores promedios mensuales por año de la radiación incidente, periodo 2010 – 2019.....	65
<b>Tabla 13:</b> Comparación de valores registrados de EMA y NASA, durante el periodo de medición (2020). ....	68
<b>Tabla 14:</b> Desarrollo del Modelo de estimación Bristow-Campbell en Excel .....	73
<b>Tabla 15:</b> Resultados promedio mensual de la aplicación del modelo Bristow-Campbell. ...	74
<b>Tabla 16:</b> Indicadores estadísticos para la aplicación del Modelo Bristow-Campbell. ....	75
<b>Tabla 17:</b> Desarrollo del Modelo de estimación Hargreaves-Samani en Excel .....	78
<b>Tabla 18:</b> Resultados promedio mensual de la aplicación del modelo Hargreaves-Samani. .	79
<b>Tabla 19:</b> Indicadores estadísticos para la aplicación del Modelo Hargreaves-Samani. ....	80
<b>Tabla 20:</b> Desarrollo del Modelo de estimación Annandale en Excel.....	82
<b>Tabla 21:</b> Resultados promedio mensual de la aplicación del Modelo Annandale. ....	83
<b>Tabla 22:</b> Indicadores estadísticos para la aplicación del Modelo Annandale. ....	84
<b>Tabla 23:</b> Análisis comparativo de los modelos de estimación mediante indicadores estadísticos. ....	86
<b>Tabla 24:</b> Radiación promedio mensual para puntos auxiliares de medición mediante el modelo BC. ....	89
<b>Tabla 25:</b> Indicadores estadísticos para la aplicación del Modelo BC, para puntos auxiliares. ....	91
<b>Tabla 26</b> Matriz de consistencia de la tesis .....	115

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> Estructura del Sol .....	15
<b>Figura 2</b> (a) Movimiento de la tierra alrededor del sol (b) Ubicación de los trópicos.....	17
<b>Figura 3</b> Espectro de radiación electromagnética .....	19
<b>Figura 4</b> Componentes diferentes de la radiación solar. ....	20
<b>Figura 5</b> Variación de la radiación solar extraterrestre con la época del año .....	21
<b>Figura 6</b> (a) Ángulo cenital, ángulo de acimut de superficie, ángulo de azimut solar y pendiente para una superficie inclinada (b) Vista en planta del ángulo del azimut solar. ....	23
<b>Figura 7</b> Interfaz del software Weatherlink .....	29
<b>Figura 8</b> Atenuación de la radiación solar a medida que pasa a través de la atmósfera .....	30
<b>Figura 9</b> Macro localización del area de estudio. ....	43
<b>Figura 10</b> Micro localización del área de registro de medición principal .....	44
<b>Figura 11</b> Macro localización del área de registro de mediciones secundarias. ....	44
<b>Figura 12</b> Trayecto hacia el área de estudio. ....	45
<b>Figura 13</b> Estación meteorológica automática DAVIS Vantage Pro2 Plus.....	53
<b>Figura 14</b> Variación diaria de la temperatura en el periodo de medición.....	57
<b>Figura 15</b> Variación promedio mensual de la temperatura en el periodo de medición. ....	57
<b>Figura 16</b> Variación diaria de la radiación incidente en el periodo de medición. ....	58
<b>Figura 17</b> Variación promedio mensual de la radiación incidente en el periodo de medición. .....	59
<b>Figura 18</b> Variación anual de la temperatura correspondiente al periodo 2010 – 2019. ....	60
<b>Figura 19</b> Variación promedio diario de la temperatura en un año promedio entre 2010 – 2019.....	62
<b>Figura 20</b> Variación promedio diaria de la temperatura en el periodo de medición (2020)...	63
<b>Figura 21</b> Variación promedio mensual de la temperatura en el periodo de medición (2020). .....	63
<b>Figura 22</b> Variación promedio anual de la radiación incidente correspondiente al periodo 2010 – 2019.....	64
<b>Figura 23</b> Variación promedio diario de la radiación incidente en un año promedio entre 2010 – 2019.....	66
<b>Figura 24</b> Variación promedio diaria de la radiación en el periodo de medición (2020). ....	67
<b>Figura 25</b> Variación promedio mensual de la radiación incidente en el periodo de medición (2020).....	67

<b>Figura 26</b> Validación de las temperaturas máximas registradas durante el periodo de medición.....	69
<b>Figura 27</b> Validación de las temperaturas mínimas registradas durante el periodo de medición.....	70
<b>Figura 28</b> Validación de la radiación promedio diaria registrada durante el periodo de medición.....	71
<b>Figura 29</b> Correlación entre la radiación mensual registrada y estimada según el modelo BC. ....	75
<b>Figura 30</b> Variación promedio mensual de la transmitancia atmosférica máxima según modelo BC. ....	75
<b>Figura 31</b> Correlación entre la radiación mensual registrada y estimada según el modelo HS. ....	80
<b>Figura 32</b> Variación promedio mensual de la transmitancia atmosférica máxima según modelo HS. ....	80
<b>Figura 33</b> Correlación entre la radiación mensual registrada y estimada según el modelo ANN.....	84
<b>Figura 34</b> Variación promedio mensual de la transmitancia atmosférica máxima según modelo ANN.....	84
<b>Figura 35</b> Radiación observada versus radiación obtenida por los modelos de estimación. ...	86
<b>Figura 36</b> Relación entre la radiación solar estimada y la amplitud térmica.....	87
<b>Figura 37</b> Relación entre la amplitud térmica y los valores de transmitancia atmosférica. ...	88
<b>Figura 38</b> Correlación entre la radiación mensual registrada y estimada según el modelo BC, para puntos secundarios.....	90
<b>Figura 39</b> Variación promedio mensual de la transmitancia atmosférica máxima según modelo BC, para puntos auxiliares.....	90
<b>Figura 40</b> Relación entre la radiación solar estimada y la amplitud térmica, para puntos auxiliares. ....	91
<b>Figura 41</b> Relación entre la amplitud térmica y los valores de transmitancia atmosférica, para puntos auxiliares. ....	92
<b>Figura 42</b> Distribución anual de la radiación solar incidente en San Mateo. ....	93
<b>Figura 43</b> Distribución de la radiación solar incidente durante enero. ....	94
<b>Figura 44</b> Distribución de la radiación solar incidente durante febrero. ....	95
<b>Figura 45</b> Distribución de la radiación solar incidente durante marzo. ....	95
<b>Figura 46</b> Distribución de la radiación solar incidente durante abril.....	96

<b>Figura 47</b> Distribución de la radiación solar incidente durante mayo. ....	97
<b>Figura 48</b> Distribución de la radiación solar incidente durante junio. ....	97
<b>Figura 49</b> Distribución de la radiación solar incidente durante julio. ....	98
<b>Figura 50</b> Distribución de la radiación solar incidente durante agosto. ....	99
<b>Figura 51</b> Distribución de la radiación solar incidente durante septiembre. ....	99
<b>Figura 52</b> Distribución de la radiación solar incidente durante octubre. ....	100
<b>Figura 53</b> Distribución de la radiación solar incidente durante noviembre. ....	101
<b>Figura 54</b> Distribución de la radiación solar incidente durante diciembre. ....	101
<b>Figura 55</b> Distribución de la radiación solar incidente en temporada de clima cálido. ....	102
<b>Figura 56</b> Distribución de la radiación solar incidente en temporada de clima frío. ....	103

## **Capítulo 1: Aspectos Generales de la Investigación**

### **1.1. Introducción**

Durante los últimos siglos la humanidad se ha provisto del uso de las fuentes primarias de energía que la naturaleza le ha brindado, aprovechando principalmente fuentes fósiles para satisfacer sus necesidades. Sin embargo, su excesivo consumo en las recientes décadas está teniendo efectos gigantescos, que está asociado con la contaminación ambiental que perjudica la vida e inclusive la del mismo planeta.

Se pueden utilizar distintas fuentes de energía alternativas en lugar de combustibles fósiles. Bajo los aspectos ambientales y de seguridad deseables se considera que la energía solar debe utilizarse en primer lugar de otras formas de energía alternativas, ya que se puede proporcionar de manera sostenible sin dañar el medio ambiente (Soteris A., 2014).

El sol proporciona energía para la mayoría de los procesos que ocurren en la superficie de la tierra. Esta energía conocida como radiación solar es transferida desde el sol en forma de energía radiante que llega a la superficie de la tierra. La radiación solar es la principal fuente de energía natural que desempeña un rol insustituible en el equilibrio energético del sistema Tierra – Atmósfera.

El conocimiento de la disponibilidad de datos de radiación solar es de fundamental importancia para utilizar la energía solar de manera económica y eficiente, además de conocer las regiones de un alto potencial para tener dicha utilización y desarrollo optimizado. Afortunadamente en el Perú se cuenta con un estudio general de la energía solar, dicha información se encuentra dentro del “Atlas de Energía Solar del Perú”, realizado por SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú) en conjunto con el MINEM (Ministerio de Energía y Minas – Gobierno del Perú), que nos permite identificar las áreas potenciales de mayor radiación solar incidente. Sin embargo, al tratarse de información general y no de forma puntual es necesario cuantificar la disponibilidad local o de un área de

aplicación. Esto ha motivado a realizarse distintos estudios a una escala más precisa, es por ello que se plantea en esta investigación determinar el potencial solar disponible en el distrito de San Mateo.

La disponibilidad de datos climáticos varía según la ubicación, por lo que el método para estimar la radiación solar debe adaptarse a cada situación. Los datos en regiones de terreno montañoso suelen ser insuficientes en cuanto a cobertura y resolución. En ese contexto, los modelos de estimación de radiación solar se convierten en un tema sumamente importante. Existen varios métodos para estimar la radiación solar que utilizan diferentes parámetros climatológicos, como son los parámetros geográficos (latitud, longitud, altitud) y parámetros meteorológicos (temperatura del aire, nubosidad, humedad y duración de la luz solar) (Almorox, Bocco, & Willington, 2013). Por ejemplo, el Atlas de Energía Solar del Perú (2003), se formuló en base a los modelos de Angstrom-Prescott y Bristow-Campbell, que estiman la radiación solar mediante la duración de la luz solar y la temperatura del aire respectivamente. Lo que nos confirma la fiabilidad de la aplicación de la utilización de modelos basados en la temperatura postulados en esta investigación para determinar el potencial solar disponible en el distrito de San Mateo.

Esta tesis se organiza de la siguiente manera: en el posterior capítulo se presenta las bases fundamentales de la investigación, modelos de estimación utilizados y se explica una clasificación de las técnicas de modelado asociados a la radiación solar. La metodología de la investigación en el capítulo 3, donde se describe las características del área de estudio, puntos de medición, el tipo de la investigación y la técnica e instrumentos de recolección de datos. En el capítulo 4 se presentan los registros obtenidos, mientras que en el capítulo 5 se visualiza la comparación estadística y análisis de resultados de la eficiencia de los modelos presentados. Finalmente, las conclusiones y recomendaciones se presentan en los capítulos 6 y 7 respectivamente.



## 1.2. Planteamiento del Problema

La energía solar es la fuente de mayor abundancia y constituye la principal fuente de vida para la tierra. La energía procedente del sol induce el movimiento de vientos, agua y crecimiento de la vegetación, por ello se considera a la energía solar como el origen de la mayor de las fuentes de energías renovables en el mundo.

En el Perú, debido a su variada topografía y gran diversidad climática, se le atribuye un potencial considerablemente elevado de energías no convencionales, condiciones excepcionales que propician el uso de este tipo de energías. Sin embargo, para promover el uso de estas energías limpias que permitan el desarrollo especialmente en zonas rurales, es necesario cuantificar esta disponibilidad, así como conocer su distribución temporal en el territorio.

Particularmente se eligió analizar la radiación solar en una zona altoandina, ubicada en el distrito de San Mateo, provincia de Huarochirí, región Lima, localizado entre las coordenadas UTM WGS-84: 374388 E y 8689191 S, a una altitud de 4458 m.s.n.m. aproximadamente, en la región Sierra del Perú. En esta zona no se han realizado investigaciones sobre radiación solar a nivel local de forma puntual, únicamente se cuenta con información del “Atlas de Energía Solar del Perú”, publicado en el año 2003 que muestra datos generales por regiones. Tampoco se dispone de estaciones meteorológicas cercanas acondicionadas para registrar datos de radiación solar, por lo que se desconoce con exactitud la disponibilidad de este recurso energético renovable.

Ante esta situación, se planteó como solución la determinación del potencial solar disponible en la zona de estudio, de modo que se pueda visualizar la tecnología a utilizar a base de energía solar como también la planificación y/o realización de proyectos de inversión pública o privada para implementar en el distrito, de manera que beneficie en cualquier aspecto a la población, mejorando así su calidad de vida.

### **1.2.1. Problema principal.**

El problema principal de la investigación recae en el desconocimiento del potencial solar del área de estudio, en consecuencia, las comunidades desaprovechan el valor excepcional de esta fuente de energía. Esta radiación está sujeta a cambios de parámetros climáticos dependiendo de las condiciones atmosféricas del área investigada. Esta información constituye un valioso aporte con el propósito de promover la inversión e investigación del uso de la energía solar como fuente alternativa renovable y no contaminante para los sectores productivos. Por lo tanto, el problema es el siguiente:

¿Cuáles son los efectos de los parámetros climáticos para la estimación del potencial solar disponible en el área de estudio?

### **1.2.2. Problemas específicos.**

#### ***1.2.2.1. Atenuación atmosférica.***

La atenuación de la radiación solar en la atmósfera está sujeta (además de la radiación extraterrestre) a dos fenómenos puntuales: dispersión atmosférica por moléculas de aire, agua y polvo y la absorción atmosférica por  $O_3$ ,  $H_2O$  y  $CO_2$ . Lo que conlleva a determinar la influencia de estos fenómenos o aproximar su efecto dentro de una constante de transmitancia atmosférica en nuestro medio fluido (atmósfera), para obtener la radiación que llega a la zona de estudio, ya que la radiación incidente varía dependiendo el lugar por el comportamiento de la atmósfera. Lo que nos plantea la siguiente interrogante:

¿Cuál es el efecto de la atenuación atmosférica para determinar el potencial solar disponible en el área de estudio?

#### ***1.2.2.2. Variabilidad topográfica y climática.***

En países en desarrollo como el Perú, donde las estaciones meteorológicas son pocas y distantes entre sí, debido a la alta variabilidad espacial que ocurre tanto en la topografía como

en el clima, significa que las mediciones de la radiación son representativas de áreas muy pequeñas. Los registros de las mediciones de radiación solar son relativamente escasos, debido al costo y los requisitos de mantenimiento y calibración de los equipos de medición, así como también la distribución espacial de las mismas (limitada cobertura). Como resultado, los modelos para estimar la radiación solar utilizados con mayor frecuencia se han basado en métodos empíricos, que requieren el desarrollo de un conjunto de ecuaciones para estimar la radiación global a partir de variables normalmente disponibles en la mayoría de las estaciones meteorológicas. Modelos de estimación que parten de parámetros meteorológicos de registro común como temperatura, precipitación o humedad. Lo que conlleva a la siguiente interrogante:

¿Cuáles son las características de funcionamiento de modelos de estimación de radiación solar convenientes ante la variabilidad topográfica y climática?

### **1.3. Justificación e Importancia**

El propósito de esta investigación es la de proporcionar una metodología y/o proceso de análisis para la determinación del potencial solar a nivel local, apoyándose en criterios descritos a continuación:

Esta investigación analiza la importancia del conocimiento de la disponibilidad de energía solar como alternativa de uso para fines productivos, que favorezcan el crecimiento de las comunidades en el área de estudio.

La realización del estudio propone disponer del valor de la variable asociada al comportamiento de la dinámica atmosférica, para la caracterización de la atmósfera y conocer su variación temporal. En consecuencia, obtener la transmitancia atmosférica para cada día del año.

La aplicación de modelos de estimación de radiación solar convenientes permitirá determinar importante información de disponibilidad de potencial solar, donde no se cuente con registro completo o adecuado en toda la superficie que involucra al área de estudio.

#### **1.4. Alcances y Limitaciones de la Investigación**

Este estudio únicamente se enfoca en la determinación del potencial solar del área de estudio. Los parámetros obtenidos son a nivel local, por lo que su utilización no podría considerarse en modelos de cálculo para otra área, ya que las condiciones varían sensiblemente en cada región y/o distrito.

Con el parámetro obtenido en esta tesis se podrán realizar posteriormente otras investigaciones para la implementación, diseño o adaptación de tecnologías a base de energía solar.

#### **1.5. Objetivos**

##### **1.5.1. Objetivo general.**

Determinar los efectos de los parámetros climáticos que permita estimar el potencial solar disponible en el área de estudio.

##### **1.5.2. Objetivos específicos.**

- Estimar el efecto de la atenuación atmosférica que influye en la determinación de la radiación solar en el área de estudio.
- Determinar las características de funcionamiento de modelos de estimación de radiación solar convenientes ante la variabilidad topográfica y climática.

#### **1.6. Hipótesis**

Los efectos de los parámetros climáticos propician el uso de modelos convenientes de estimación de radiación solar que permiten determinar el potencial solar en el área de estudio.

## Capítulo 2: Marco Teórico

### 2.1. Antecedentes

En la presente investigación se consideró distintos estudios como referencia para la obtención de la radiación solar incidente en un área determinada por medio de parámetros meteorológicos de común registro. Se denota el uso de modelos de estimación que utilizan fórmulas empíricas basadas en la amplitud térmica y las condiciones en las que se adecua para una región en específico. Apoyados desde una base de datos obtenida por registro histórico en una estación meteorológica, hasta la extracción de los mismos a través de plataformas confiables en internet que utilizan base de datos de la NASA. Los resultados obtenidos nos indican un balance positivo en el uso de dichos modelos de estimación para la determinación del potencial solar disponible, recomendando siempre adecuarse a las condiciones del área de estudio.

#### 2.1.1. Antecedentes nacionales.

Corrales P. & Villegas Z. (2013), analizan en su publicación *“Determinación de la cantidad de radiación solar incidente en parámetros verticales en  $W/m^2h^{\circ}C$  en diferentes direcciones a partir de la radiación horizontal incidente en la ciudad de Huaraz - Perú”*, la determinación de la radiación solar global horizontal, con la finalidad de obtener del estudio un modelo válido y confiable para su aplicación, considerando siempre las condiciones del lugar. Esta radiación fue calculada mediante el modelo de estimación Bristow-Campbell, modelo que utiliza las temperaturas ambientales máximas y mínimas del promedio diario mensual, para luego descomponer la radiación en directa y difusa, lo que permitió calcular y correlacionar la radiación vertical horaria en diferentes direcciones. El modelo se calibró utilizando los valores de coeficientes propuestos en el Atlas de Energía Solar del Perú (2003) y el registro de las estaciones meteorológicas ubicadas en la región.

Camayo Lapa, Massipe Hernández, Pomachagua Paucar, Torres Ten, & Quispe Flores (2015), en su investigación “*Desarrollo del modelo Bristow Campbell para estimar la radiación solar global de la región de Junín, Perú*”, hace referencia a disponer de un modelo adecuado para estimar la radiación solar diaria promedio mensual usando como base el registro de temperaturas máximas y mínimas medidas en las estaciones meteorológicas de la región. Dicha información es complementada con las ecuaciones propuestas por el Atlas de Energía Solar del Perú (2003). Es de suma importancia ya que no se cuenta con datos medidos de radiación solar global en las estaciones de la Región Junín para elaborar una base estimada de datos de este recurso. Finalmente, con el propósito de contar con un mecanismo que calcule la radiación solar sobre la superficie horizontal terrestre en la Región Junín, se adaptó el modelo Bristow-Campbell, obteniendo así un modelo confiable que permite estimar la radiación solar global.

Rojas Pisco & Flores (2015), en su tesis de maestría “*Evaluación del software (SISA) para simular la irradiación solar en la amazonia peruana (Estaciones meteorológicas experimentales de Iquitos, Nauta y Tamshiyacu)*”, proponen un software que utiliza como algoritmos los términos numéricos que expresa el modelo matemático Bristow-Campbell, además realizan la comparativa mediante las plataformas Simulink de Matlab y Excel, aplicando de igual manera el modelo de estimación. El registro de datos de entrada que utiliza el modelo Bristow-Campbell se extrajo de la base de datos de las estaciones meteorológicas experimentales de Iquitos, Nauta y Tamshiyacu, obteniendo resultados favorables tanto para el software propuesto por los autores como para las plataformas utilizadas, dando validez y confiabilidad a las mediciones obtenidas.

Gastelo Roque, Morales Acevedo, & Tineo Soto (2017), en su trabajo *“Estimación de la radiación solar diaria y ángulos de inclinación óptimos para Lambayeque (Perú) utilizando el modelo de Hargreaves-Samani”*, postulan la utilización del modelo de estimación de radiación solar Hargreaves-Samani. Modelo que relaciona la radiación solar incidente con la diferencia de temperaturas máximas y mínimas, a través de una constante de ajuste. El estudio se realizó en la Ciudad de Lambayeque, Perú y los datos de temperatura fueron proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), mientras que los valores de radiación se extrajeron de la base de datos de la NASA. Los autores mencionan que su objetivo fue de proporcionar un método fácil y confiable para estimar datos diarios de radiación solar, con la finalidad de promover las aplicaciones de energía solar. Finalmente concluyen que el modelo Hargreaves-Samani resultó un método fiable.

L. Quispe H. (2018), propuso en su tesis de maestría *“Determinación y análisis espacio temporal de la radiación solar global en el altiplano de Puno”*, la utilización del modelo Bristow-Campbell para estimar la radiación solar global diaria a partir de datos de temperaturas extremas diarias, registradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI Puno. El registro histórico de las variables medidas data desde el 2007 hasta el 2013, obtenidas de las estaciones meteorológicas de la región, con los que se desarrolló el modelo y se concluyó que permite determinar la radiación global diaria confiablemente en el altiplano de Puno en las zonas circunlacustre, puna húmeda y clima de altura.

### **2.1.2. Antecedentes internacionales.**

Bandyopadhyay, Bhadra, Raghuwanshi, & Singh (2008), presentan en su investigación *“Estimation of monthly solar radiation from measured air temperature extremes”*, el cálculo de la radiación solar a través del uso de ecuaciones empíricas a partir de temperaturas extremas de las temperaturas del aire, medidas rutinariamente en 29 estaciones meteorológicas



distribuidas en toda la India. Los modelos de estimación utilizados fueron Hargreaves-Samani, Annandale, Allen, Samani y Bristow-Campbell, indicando que la precisión de estas estimaciones por diferentes métodos necesita ser probada dada las condiciones de la India. Para ello se obtuvo valores de la radiación estimada con coeficientes Angstrom calibrados localmente. Finalmente, mediante la comparación de rendimientos usando indicadores estadísticos concluyen que los mejores métodos resultaron Hargreaves-Samani y Annandale.

Almorox, Bocco, & Willington (2013), en su publicación *“Estimation of daily global solar radiation from measured temperatures at Cañada de Luque, Córdoba, Argentina”*, donde se realizó un estudio comparativo de cinco modelos representativos para predecir la radiación solar global, ajustando los coeficientes empíricos para aumentar la aplicabilidad local. Entre los cuales se puede visualizar: Hargreaves-Samani, Allen, Samani, Bristow-Campbell y Almorox. Todos los modelos se basaron en variables meteorológicas fácilmente disponibles, sin horas de sol como entrada. Mediante una estación meteorológica automática ubicada en Cañada de Luque (clima subtropical húmedo) se proveían los datos de entrada para la aplicación de los modelos mencionados. Los datos de radiación solar medidos y estimados se analizaron utilizando varios coeficientes estadísticos. Los resultados mostraron que todos los modelos analizados eran robustos y precisos, siendo los más destacados los modelos Hargreaves-Samani y Bristow-Campbell. Los cuales podrían usarse directamente con los valores típicos para estimar la radiación solar.

Gavilán (2010), evalúa en su trabajo *“Modelos de estimación de la radiación solar diaria a partir de medidas de la temperatura”*, la precisión de las estimaciones de la radiación solar utilizando distintos modelos basados en la temperatura del aire, dentro de las cuales están Hargreaves-Samani, Bristow-Campbell y 3 variaciones de ambas (Annandale, Allen y

Goodin), con la finalidad de obtener una calibración que se ajuste a las condiciones de la región. El investigador hace hincapié en la falta de mediciones de este recurso en varias de las estaciones meteorológicas y que los valores medidos por algunas son en ciertos casos poco fiable, por consecuencia de fallos en los sensores y/o ausencia de calibración de los mismos. Los resultados obtenidos de la investigación realizada en Andalucía (España), utilizando dichos modelos, fueron comparados con datos medidos en tierra determinando valores razonablemente precisos.

Torrez, Burgoa, & Ricaldi (2013), validan en su investigación *“Modelos de estimación de la radiación solar para el altiplano central de Bolivia”*, los modelos Bristow-Campbell y Hargreaves-Samani de estimación de radiación solar, con el objetivo de aplicar dichos métodos basados en la amplitud térmica en la extensa geografía del altiplano central de Bolivia. Los autores justifican la aplicación de los métodos aplicados por su simplicidad y fácil obtención de parámetros de entrada. El registro histórico de los datos utilizados fue de 2 años. Por último, de la investigación se resalta que la aplicación de ambos modelos es correctamente posible y que los errores son mínimos y sencillamente superables.

Quej, Almorox, Ibrakhimov, & Saito (2016), analizan en su trabajo *“Empirical models for estimating daily global solar radiation in Yucatán Península, México”*, la precisión y la aplicabilidad de trece modelos empíricos de radiación solar global para regiones cálidas subhúmedas, de las cuales nos interesan cuatro de esos modelos, ya que utilizan solo la temperatura diaria del aire. Los autores mencionan la dificultad que existe en obtener registros válidos de radiación solar, debido a la poca cobertura espacial de las estaciones meteorológicas y que en muchas ocasiones es inadecuada o escasa. Además, la mayoría de estas estaciones tienen mediciones erróneas o carecen de ellas debido a la falta de mantenimiento y/o

calibración de los sensores de radiación solar. En el análisis los modelos utilizados fueron Hargreaves-Samani, Bristow-Campbell, Donatelli-Campbell y Goodin, donde el modelo de Bristow-Campbell obtuvo los mejores resultados.

Gastelo Roque & Morales Acevedo (2017), propusieron en su trabajo *“Estimación de la radiación solar global diaria utilizando el modelo de Hargreaves-Samani”*, la utilización del modelo de estimación de radiación solar Hargreaves-Samani. Modelo que relaciona la radiación solar incidente con la diferencia de temperaturas máximas y mínimas, a través de una constante de ajuste. El estudio se realizó en la Ciudad de Hermosillo en Sonora, México y los datos de temperatura fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias INIFAP, mientras que los valores de radiación se extrajeron de la base de datos de la NASA. Los autores mencionan que su objetivo fue de proporcionar un método fácil y confiable para estimar datos diarios de radiación solar, con la finalidad de promover las aplicaciones de energía solar. Con lo que se concluye que el modelo Hargreaves-Samani resultó un método fiable.

Adamala & Krishna Reddy (2019), mediante su investigación *“Evaluation of Different Solar Radiation Estimation Methods for Indian Locations”*, pretenden determinar o estimar la radiación solar en la India mediante el uso de 6 ecuaciones empíricas (Hargreaves-Samani, Allen, Hunt, Annandale, Li y horas sol). Utilizando datos extraídos del software CLIMWAT 2.0, los cuales contienen promedios mensuales a largo plazo de temperatura, humedad relativa, horas sol, precipitación y radiación solar. Los autores hacen mención que, de los modelos presentados, los que utilizan como parámetro de entrada a la temperatura se requiere probar su aplicabilidad para una estimación precisa para diferentes ubicaciones climáticas. El resultado mostró que el método basado en la hora de sol funcionó mejor entre todos los métodos de

estimación en casi todas las estaciones, pero los modelos basados en temperatura (de práctica aplicabilidad) Hargreaves-Samani y Annandale obtuvieron buena clasificación para la mayoría de ubicaciones.

Mudasiru & Mustafa (2019), en su trabajo *“Estimation of Global Solar Radiation on Horizontal Surface in Kano, Nigeria Using Air Temperature Amplitude”*, calibran, validan, evalúan y comparan cuatro modelos empíricos basados en la temperatura del aire, para luego elegir el más apropiado para calcular la radiación solar global en el aeropuerto de Kano, Nigeria. De los modelos utilizados podemos encontrar Hargreaves-Samani, Allen, Bristow-Campbell y Samani. Estos modelos pretenden utilizar la amplitud térmica de la temperatura del aire como una modificación de la cantidad de nubes, por lo que miden el estado del cielo. El registro histórico para su evaluación se extrajo de los archivos de la NASA y como resultado el modelo Samani fue el que indicaba el mejor rendimiento, seguido por los modelos Allen y Hargreaves respectivamente, mientras que el Bristow-Campbell tuvo el mayor error.

## **2.2. Marco Conceptual**

### **2.2.1. El sol y su aporte energético.**

El sol es una gran esfera de materia altamente caliente de  $13.9 \times 10^5$  km de diámetro compuesta por muchas capas de gases, que son cada vez más calientes a medida que se acerca al centro. La capa más externa, desde donde se irradia energía al sistema solar, se encuentra aproximadamente a una temperatura equivalente del cuerpo negro de 5760 K (Yogi Goswami, 2015). La Figura 1 nos indica la composición y una estructura esquemática del sol, donde se aprecia que las temperaturas en las regiones interiores centrales se estiman entre  $8 \times 10^6$  a  $40 \times 10^6$  K y la densidad se calcula en aproximadamente 100 veces la del agua.

El sol es un reactor de fusión continuo con gases constituyentes, es como un "recipiente de contención" retenido por fuerzas gravitacionales (Duffie & Beckman, 2013). Se ha confirmado

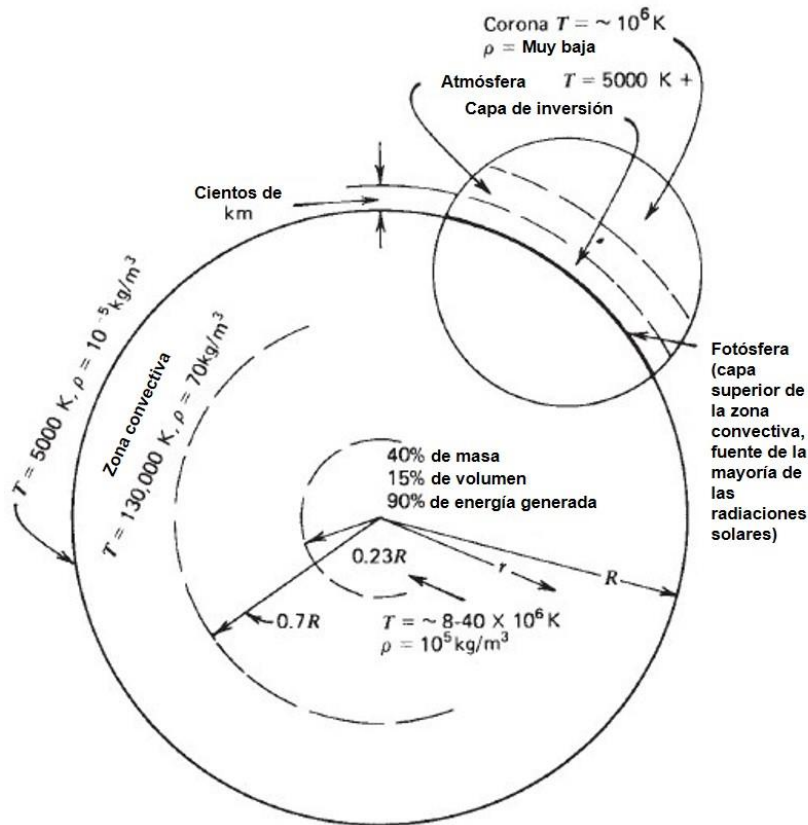
mediante mediciones espectrales la presencia de casi todos los elementos conocidos en el sol. Sin embargo, el 80% de su composición es hidrógeno y el 19% es helio. Por lo que los más de 100 elementos observados constituyen solo una pequeña fracción de la configuración del sol. En líneas generales, se ha aceptado que la fuente de energía del sol es una reacción termonuclear de hidrógeno a helio. Aunque, debido a que dicha reacción no se ha conseguido replicar en algún laboratorio, no se tiene claro exactamente cuál es el mecanismo de la reacción, qué papel juegan los flujos turbulentos en el sol, cómo se crean las prominencias solares y las manchas solares (Yogi Goswami, 2015).

Dentro de las características de la superficie del sol podemos mencionar que parece estar compuesta de gránulos (células de convección irregular), con dimensiones de 1000 a 3000 km y con una vida útil de cada célula de unos pocos minutos. Además, existen pequeñas áreas pequeñas conocidas como poros, de magnitud y mismo orden que las células convectivas y áreas oscuras más grandes llamadas manchas solares, que varían en tamaño (Duffie & Beckman, 2013). La capa superior en la parte exterior de la zona convectiva se le conoce como fotosfera (ver Figura 1), su borde está bien definido a pesar de su baja densidad (alrededor de  $10^{-4}$  del aire en el nivel del mar). Es considerablemente opaco, ya que los gases por los que está compuesto están estrictamente aislados, son capaces de absorber y emitir un continuo espectro de radiación. La característica principal de la fotosfera es ser la fuente de la mayoría de las radiaciones solares (Duffie & Beckman, 2013).

A los exteriores de la fotosfera se encuentra una atmósfera solar regularmente transparente, que es posible observar durante un eclipse total de sol o por un instrumento que oculte el disco solar. Por encima de la fotosfera (ver Figura 1) hay una capa más fría de gases separada por varios cientos de kilómetros llamada capa de inversión. Un poco más al exterior de dicha capa, se encuentra una capa denominada cromósfera, con una profundidad aproximada de 10,000 km. Esta es una capa gaseosa con temperaturas ligeramente más altas que las de la fotosfera,

pero con menor densidad. Finalmente, aún alejada se encuentra la corona, una región de menor densidad y temperaturas bastante elevadas ( $10^6$  K) (Duffie & Beckman, 2013).

*Figura 1 Estructura del Sol*



*Fuente: Duffie & Beckman, 2013.*

La energía solar es la fuente de energía permanente de mayor abundancia del mundo. La cantidad de energía solar que intercepta el planeta tierra es 5000 veces mayor que la suma de todas las demás entradas (energías terrestres nucleares, geotérmicas y gravitacionales, y energía gravitacional lunar). De dicha cantidad el 30% se refleja en el espacio, el 47% se convierte en calor a baja temperatura y se dirige al espacio, y el 23% alimenta el ciclo de evaporación/precipitación de la biosfera. Por último, menos del 0,5% está representado por la energía cinética de las olas, energía cinética del viento y del almacenamiento fotosintético en las plantas (Yogi Goswami, 2015).

Para nosotros es de sumo interés la cantidad de energía emitida, su distribución espectral, distribución temporal y su variación con la hora del día y el año, ya que la radiación solar que

llega a la superficie de la tierra es un insumo indispensable para muchos estudios sobre agricultura, hidrología y cambio climático. Además, es un índice crucial en el diseño de dispositivos solares.

La energía solar que llega a la Tierra impulsa la mayor parte del ciclo físico y biológico en el sistema de la Tierra. Además, su utilización podría mitigar la contaminación ambiental cuando se utiliza como fuente de energía alternativa a las fuentes de energía convencionales.

Esta energía que llega a la superficie se conoce como radiación terrestre y toda ella es solo aproximadamente un tercio del total de la radiación extraterrestre durante un año, el 70% de eso cae sobre los océanos y el resto de  $1.5 \times 10^{17}$  kWh que cae en tierra, que es una cantidad prodigiosa de energía, solo una pequeña fracción de este total puede utilizarse debido a factores físicos (Yogi Goswami, 2015).

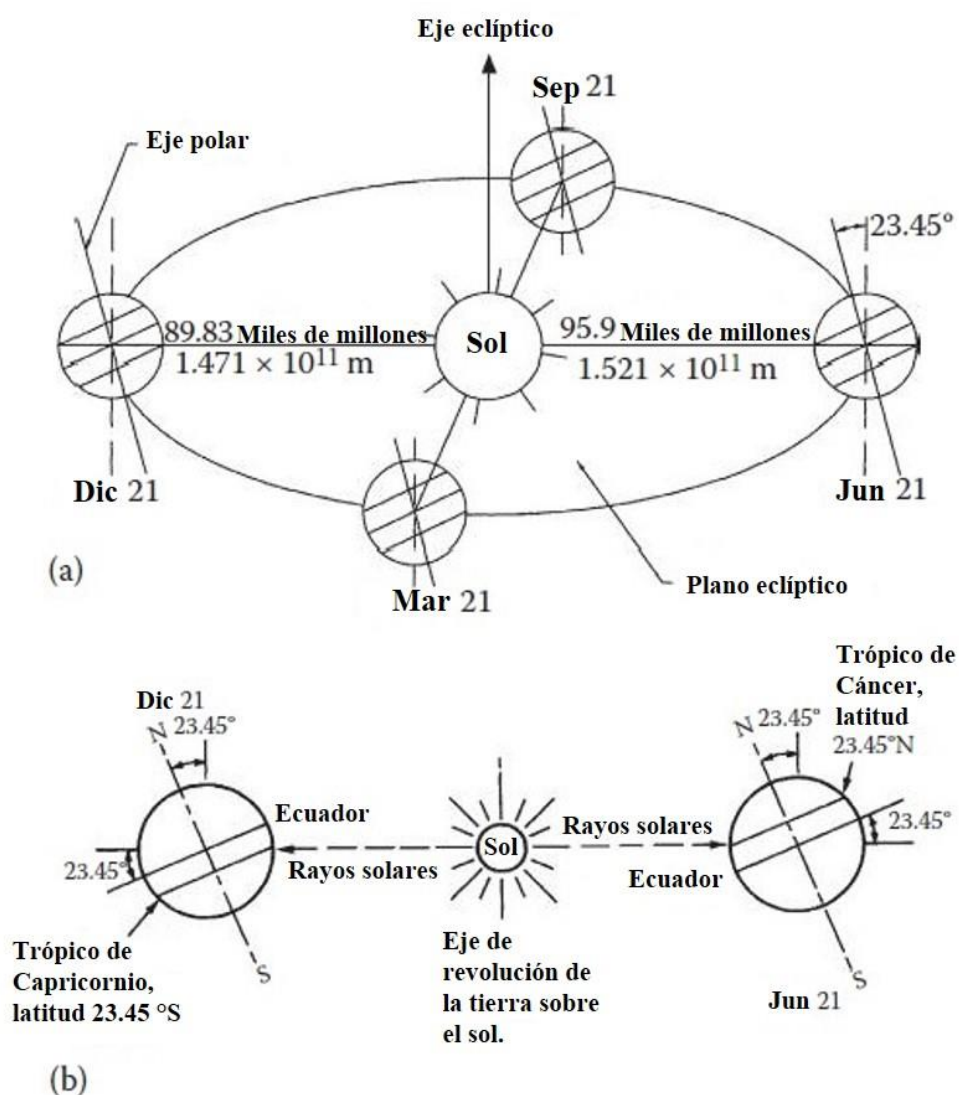
### **2.2.2. Relación geométrica entre el sol y la tierra.**

La relación de distancia entre la tierra y el sol cambia a lo largo del año, el mínimo es  $1.471 \times 10^{11}$  m en el solsticio de verano (21 de diciembre) y el máximo es  $1.521 \times 10^{11}$  m en el solsticio de invierno (21 de junio), por lo que la distancia promedio es  $1.496 \times 10^{11}$  m durante todo el año. Por lo tanto, la cantidad de radiación solar interceptada por la Tierra varía a lo largo del año, la mínima es el 21 de diciembre y la máxima el 21 de junio (Yogi Goswami, 2015). El eje de la rotación diaria de la Tierra alrededor de sí mismo está en un ángulo de  $23,45^\circ$  con respecto al eje de su plano orbital eclíptico alrededor del sol (ver Figura 2a). Esta inclinación es la causa principal de la variación estacional de la radiación solar disponible en cualquier lugar de la tierra. El ángulo entre la línea tierra-sol (a través de sus centros) y el plano a través del ecuador se denomina declinación solar,  $\delta$ . La declinación varía entre  $-23.45^\circ$  el 21 de diciembre a  $+23.45^\circ$  el 21 de junio (Yogi Goswami, 2015). Dicho de otra manera, la declinación tiene el mismo valor numérico que la latitud en la que el sol está directamente arriba al mediodía solar en un día determinado. Los trópicos de Cáncer ( $23.45^\circ$  N) y



Capricornio ( $23.45^\circ$  S) se encuentran en las latitudes extremas donde el Sol está arriba por lo menos una vez al año, como se muestra en la Figura 2b. Los círculos ártico y antártico se definen como aquellas latitudes por encima de las cuales el sol no se eleva por encima del plano del horizonte al menos una vez al año. Se ubican, respectivamente, a  $66\frac{1}{2}^\circ$  N y  $66\frac{1}{2}^\circ$  S. Las declinaciones al norte del ecuador (verano en el hemisferio norte) se designan como positivas; los del sur, negativos (Yogi Goswami, 2015).

**Figura 2** (a) Movimiento de la tierra alrededor del sol (b) Ubicación de los trópicos



Fuente: Yogi Goswami, 2015.

De Luque & Hegedus (2003) el plano que contiene esta órbita se llama *plano eclíptico* y el tiempo que demora la Tierra en completar esta órbita lleva a la definición del año. La distancia del sol a la tierra,  $r$ , viene dada por:

$$r = r_0[1 + 0.017 * \sin(\frac{360(d_n-93)}{365})] \quad (2.1)$$

donde  $d_n$  es el número del día contado desde el comienzo del año (ver Tabla 1).

**Tabla 1:**  
*Día Juliano*

Valor de “ $d_n$ ” por mes	
Enero	$i$
Febrero	$31 + i$
Marzo	$59 + i$
Abril	$90 + i$
Mayo	$120 + i$
Junio	$151 + i$
Julio	$181 + i$
Agosto	$212 + i$
Septiembre	$243 + i$
Octubre	$273 + i$
Noviembre	$304 + i$
Diciembre	$334 + i$

Fuente: Duffie & Beckman (2013).

Donde “ $i$ ” es la fecha del mes correspondiente.

De Luque & Hegedus (2003), cabe mencionar que la excentricidad de la eclíptica es solo 0.017, es decir, muy pequeña. Debido a eso, la desviación de la órbita de la circular también es muy pequeña, y normalmente es adecuada para expresar la distancia solo en términos de su valor medio  $r_0$ , igual a  $1.496 \times 10^8$  km, y generalmente se denomina *unidad astronómica*, 1

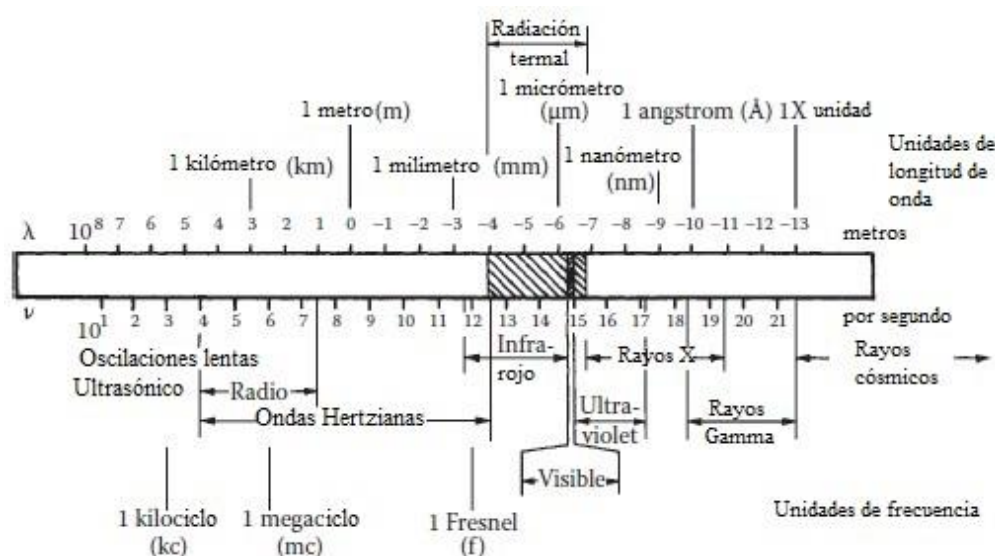
UA. Para gran parte de las aplicaciones de ingeniería, una expresión muy simple y útil para el llamado factor de corrección de excentricidad es:

$$\varepsilon = (r_0/r)^2 = 1 + 0.033 * \cos(\frac{360(d_n)}{365})] \quad (2.2)$$

### 2.2.3. Radiación solar.

La radiación solar es la energía electromagnética emitida, transferida o recibida por el sol, con longitudes de onda que van desde aproximadamente  $0,3 \mu\text{m}$  ( $10^{-6} \text{ m}$ ) a más de  $3 \mu\text{m}$ , que corresponden a ultravioleta (menos de  $0,4 \mu\text{m}$ ), visible ( $0,4$  y  $0,7 \mu\text{m}$ ) e infrarroja (más de  $0,7 \mu\text{m}$ ). La mayor parte de esta energía se concentra en el rango de longitud de onda visible y en el infrarrojo cercano (ver Figura 3). La radiación solar incidente, también llamada insolación, se mide como la irradiancia, o la energía por unidad de tiempo por unidad de área (o potencia por unidad de área). Las unidades más utilizadas son vatios por metro cuadrado ( $\text{W/m}^2$ ), unidades térmicas británicas por hora por pie cuadrado ( $\text{BTU/h}\cdot\text{ft}^2$ ) y Langleys por minuto (calorías por centímetro cuadrado por minuto,  $\text{cal/cm}^2\cdot\text{min}$ ) (Yogi Goswami, 2015).

*Figura 3 Espectro de radiación electromagnética*

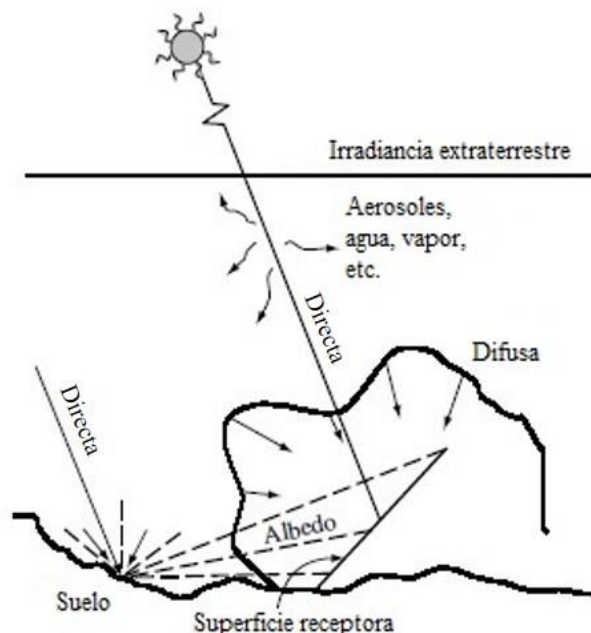


*Fuente: Yogi Goswami, 2015.*

### 2.2.4.1. Componentes de Radiación Solar.

Observando la Figura 4 nos permite ilustrar una breve explicación de los diferentes componentes de la radiación solar que alcanzan una superficie receptora terrestre plana.

*Figura 4 Componentes diferentes de la radiación solar.*



*Fuente: Luque & Hegedus, 2003.*

A medida que la radiación solar pasa a través de la atmósfera de la Tierra, esta se modifica por la interacción con los componentes presentes allí. Algunos de estos, como las nubes, reflejan la radiación. Otros, por ejemplo, ozono, oxígeno, dióxido de carbono y vapor de agua, tienen una absorción significativa en varias bandas espectrales específicas. Las gotas de agua y el polvo suspendido también causan dispersión.

El resultado de todos estos procesos es la descomposición de la radiación solar incidente en un receptor en la superficie de la Tierra en componentes claramente diferenciados. La radiación directa o de haz, formada por haces de luz que no se reflejan o dispersan, llega a la superficie en línea recta desde el sol. La radiación difusa, proveniente de todo el cielo, aparte del disco del sol, es la radiación dispersada hacia el receptor. La radiación de albedo es la radiación reflejada desde el suelo. La radiación total que cae sobre una superficie es la suma de estas (directa + difusa + albedo) y se denomina radiación global (Luque & Hegedus, 2003).

#### 2.2.4. Radiación solar extraterrestre.

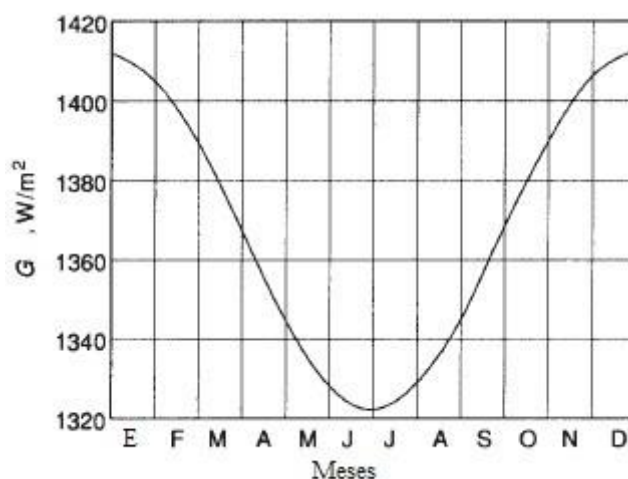
Es la energía radiante que cae sobre un receptor situado más allá de la atmósfera de la Tierra y consiste casi exclusivamente en radiación que viaja a lo largo de una línea recta desde el sol, dado que el espacio intermedio está casi desprovisto de material que podría dispersar o reflejar la luz, aparece prácticamente negro, aparte del sol y los puntos débiles de luz correspondientes a las estrellas (Luque & Hegedus, 2003).

En una buena aproximación, el sol actúa como un emisor perfecto de radiación (cuerpo negro) a una temperatura cercana a los 5760 K (Yogi Goswami, 2015). La potencia resultante que incide en una unidad de área perpendicular al haz fuera de la atmósfera de la Tierra, cuando está a 1 UA del Sol, es conocida como la constante solar (Luque & Hegedus, 2003).

La variación en la disponibilidad de radiación solar estacional en la superficie de la tierra, se puede comprender a partir de la geometría del movimiento relativo de la tierra alrededor del sol. Como la órbita de la Tierra es elíptica, la distancia entre la Tierra y el Sol varía durante un año, y la variación es de  $\pm 1.7\%$  de la media (Yogi Goswami, 2015).

La Figura 5 muestra la variación de la radiación extraterrestre en cada época del año, las modificaciones de la distancia entre la Tierra y el Sol conducen a una alteración del flujo de radiación extraterrestre aproximado de  $\pm 3.3\%$ .

*Figura 5 Variación de la radiación solar extraterrestre con la época del año*



*Fuente: Duffie & Beckman, 2013.*

Para medir la radiación extraterrestre se realizan varios tipos de cálculos convenientes utilizando niveles de radiación normalizados, es decir, la relación que existe entre el grado de radiación incidente normal y la radiación teórica disponible de no haber atmosfera. Para realizar los siguientes cálculos se necesita una metodología a seguir (Duffie & Beckman, 2013).

Para cualquier instante, la radiación solar que incide en un plano horizontal por encima de la atmósfera es la radiación solar incidente normal:

$$G_0 = G_{sc} * \left(1 + 0.033 * \cos \frac{360*n}{365}\right) * \cos \theta_z \quad (2.10)$$

Donde  $G_{sc}$  es la constante solar y  $n$  es el día del año. Reemplazando la ecuación (2.5) en la ecuación (2.10) se obtiene  $G_0$  en cualquier instante entre la salida y la puesta del sol para una superficie horizontal:

$$G_0 = G_{sc} * \left(1 + 0.033 * \cos \frac{360*n}{365}\right) * (\cos \varphi * \cos \delta * \cos \omega + \sin \varphi * \sin \delta) \quad (2.11)$$

Frecuentemente para la estimación de la radiación solar diaria, es necesario tener la radiación extraterrestre diaria en condiciones para una superficie horizontal,  $H_0$ . Esto se obtiene al integrar la ecuación (2.11) para el período que va desde el alba hasta el atardecer. Si  $G_{sc}$  está  $\text{W/m}^2$ , entonces  $H_0$  está en  $\text{J/m}^2\text{s}$ :

$$H_0 = \frac{24*3600*G_{sc}}{\pi} * \varepsilon * (\cos \varphi * \cos \delta * \cos \omega_s + \frac{\pi*\omega_s}{180} * \sin \varphi * \sin \delta) \quad (2.12)$$

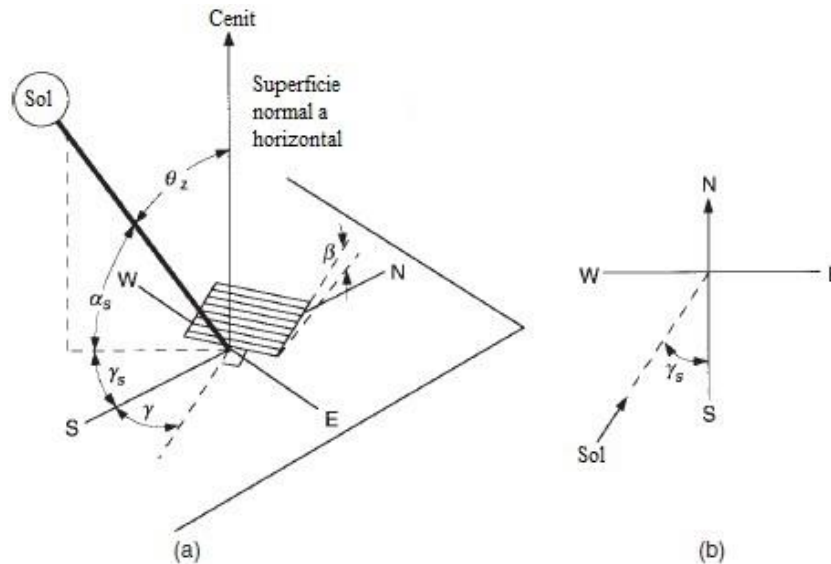
Donde  $\omega_s$  es el ángulo (en grados) de la hora de la puesta del sol de la ecuación (2.4) y  $\varepsilon$  es el factor de excentricidad, de la ecuación (2.2) (Duffie & Beckman, 2013).

### 2.2.5. Dirección del haz de radiación.

La correspondencia geométrica viene dada entre un plano en cualquier orientación con respecto a la Tierra para cualquier instante (así el plano se encuentre fijo o en movimiento) y la radiación solar del haz entrante, es decir, la ubicación del sol en relación con ese plano. Según Benford & Bock (1939) esto se puede describir en términos de varios ángulos. De Duffie

& Beckman (2013) bajo un conjunto de convenciones consistentes los ángulos (ver Figura 6a) y sus signos son los siguientes:

**Figura 6** (a) Ángulo cenital, ángulo de acimut de superficie, ángulo de azimuth solar y pendiente para una superficie inclinada (b) Vista en planta del ángulo del azimuth solar.



Fuente: Duffie & Beckman, 2013.

**Latitud ( $\phi$ ):** Es la ubicación angular al norte o al sur del ecuador, norte positivo;  $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ .

**Declinación ( $\delta$ ):** Es la posición angular del sol en el mediodía solar (cuando el sol está en el meridiano local) con respecto al plano del ecuador, norte positivo;  $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$ .

Para nuestros propósitos actuales, puede considerarse aproximadamente constante en el transcurso de cualquier día. La variación máxima en  $\delta$  durante 24 h es inferior a  $0.5^\circ$ . Si los ángulos al norte del ecuador se consideran positivos y al sur del ecuador se consideran negativos, la declinación solar se puede encontrar en la ecuación aproximada planteada por Cooper (1969):

$$\delta = 23.45^\circ * \sin\left[\frac{360(d_n + 284)}{365}\right] \quad (2.3)$$

**Pendiente ( $\beta$ ):** Es el ángulo formado entre el plano de la superficie en cuestión y la horizontal;  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ . (Donde  $\beta > 90^\circ$  indica un componente de la superficie orientado hacia abajo).

**Ángulo azimut de superficie ( $\gamma$ ):** Es la desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie desde el meridiano local, con cero hacia el sur, este negativo y oeste positivo;  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ .

**Ángulo horario ( $\omega$ ):** Es el desplazamiento angular del sol estando al este u oeste del meridiano local a consecuencia de la rotación de la tierra sobre su eje a  $15^\circ$  por hora (mañana negativa, tarde positiva).

- **Ángulo de salida del sol al amanecer ( $\omega_s$ ):** Es el ángulo que se forma con los primeros rayos del sol al amanecer con respecto a la superficie horizontal del lugar. Depende de la declinación solar y la latitud:

$$\omega_s = -\cos^{-1}(\tan \delta * \tan \varphi) \quad (2.4)$$

**Ángulo de incidencia ( $\theta$ ):** Es el ángulo formado entre la radiación del haz y la normal a esa superficie.

Se definen ángulos complementarios que describen la posición del sol:

**Ángulo cenital ( $\theta_z$ ):** Es el ángulo formado entre la línea hacia el sol y la normal, es decir, el ángulo de incidencia de la radiación del haz en una superficie horizontal.

$$\cos \theta_z = \cos \varphi * \cos \delta * \cos \omega + \sin \varphi * \sin \delta \quad (2.5)$$

**Ángulo de altitud solar ( $\alpha_s$ ):** Es el ángulo formado entre la horizontal y la línea hacia el sol, es decir, el complemento del ángulo cenital.

**Ángulo acimut solar ( $\gamma_s$ ):** Es el desplazamiento angular que se muestra en la Figura 6b que va desde el sur de la proyección de radiación del haz al plano horizontal. Estos desplazamientos en el este del sur son negativos, mientras que en el oeste del sur son positivos.

## 2.2.6. Medición de la radiación solar.

De acuerdo con Yogi Goswami (2015), las mediciones de la radiación son de importancia para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería, especialmente las de aplicaciones térmicas que incluyen valores de radiación solar directa, total, integrada en todas las longitudes de onda,



en forma directa, por hora, diaria y mensual. Por otro lado, algunas aplicaciones como la fotovoltaica, la fotoquímica y la luz natural, requieren el conocimiento de valores espectrales (específicos de longitud de onda) o de banda (en un rango de longitud de onda, por ejemplo: radiación ultravioleta, visible e infrarroja) de la radiación solar. Los instrumentos utilizados para medir la radiación solar y algunas fuentes de datos medidos a largo plazo para diferentes partes del mundo se describen a continuación:

#### ***2.2.6.1. Instrumentos para medir la radiación solar.***

Actualmente existen dos tipos de instrumentos básicos utilizados para medir la radiación solar, los cuales son: pirheliómetro y piranómetro. Un pirheliómetro tiene una vista restringida (aproximadamente  $5^\circ$ ) y se usa a menudo para medir la radiación solar directa apuntando hacia el sol. El receptor se ubica usualmente en el fondo del tubo que lo envuelve, esto le protege de la irradiación indirecta. Existen diferentes tipos de pirheliómetro que se determinan por la forma del tubo y la ubicación del receptor (Ministerio de Energía y Minas & SENAMHI, 2003). Por otro lado, un piranómetro tiene una vista hemisférica del entorno y se utiliza para cuantificar la radiación solar total, directa y difusa en una superficie. (Yogi Goswami, 2015). Los piranómetros también se usan para medir la radiación difusa del cielo utilizando una banda de sombra para bloquear la vista directa del sol (Iqbal, 1983).

Un piranómetro consiste en un sensor/detector plano con una vista hemisférica no obstruida, que le permite convertir y correlacionar la radiación total incidente en el sensor con una señal medible. Los piranómetros que usan detectores térmicos para mediciones pueden mostrar errores graves en ángulos de inclinación desde la horizontal debido a la convección libre. Estos errores se minimizan encerrando el detector en cúpulas de vidrio de alta transmisión de doble hemisferio. El segundo domo minimiza el error atribuido al intercambio de radiación infrarroja entre el sensor y el cielo. Por lo general, se proporciona un desecador para eliminar el efecto de la condensación en el sensor o el domo (Yogi Goswami, 2015).

### ***2.2.6.3. Mapeo de radiación solar usando datos satelitales***

Los datos satelitales de detección remota se han utilizado desde principios de la década de 1960, para extraer datos de nube cuantitativos y cualitativos. La aplicación más importante del mapeo de la cubierta de nubes ha sido para la observación de tormentas, huracanes, etc. Sin embargo, por estos tiempos se viene desarrollando su aplicación en el uso de los datos de mapeo de nubes para estimar la radiación solar terrestre, debido a que los satélites meteorológicos de varios países ahora pueden cubrir la mayor parte de la Tierra. Los datos registrados pueden utilizarse para estimar la radiación solar donde no existen datos medidos o no se está midiendo ninguno (Yogi Goswami, 2015).

Los satélites meteorológicos están disponibles en tres configuraciones de órbita principales: ecuatorial, polar y geoestacionaria. Los satélites ecuatoriales son satélites en órbita de bajo nivel (~ 600 km de altitud) que generalmente orbitan la Tierra en dirección oeste a este en una trayectoria sinusoidal que cruza el ecuador al menos dos veces por órbita. Los satélites polares también son satélites de órbita baja (800 – 900 km de altitud) que orbitan la Tierra desde el Polo Norte hasta el Polo Sur, mientras que la Tierra gira debajo. Las órbitas polares síncronas del sol tienen sus órbitas sincronizadas con el sol, de modo que el mismo punto de la Tierra se ve a la misma hora todos los días. Los satélites de órbita baja son capaces de recopilar datos espaciales de alta resolución (Yogi Goswami, 2015). Un satélite geoestacionario orbita de tal manera que siempre está sobre el mismo punto en la superficie de la tierra. Los satélites geoestacionarios tienen altitudes muy altas (aproximadamente 36,000 km) y pueden proporcionar imágenes de alta resolución temporal en una gran parte de la superficie terrestre. Varios países mantienen satélites geoestacionarios, incluidos los Estados Unidos (GOES, longitudes 70° W y 140° W), Europa (METEOSAT, longitud 0°), India (INSAT, longitud 70° E) y Japón (GMS, longitud 140). ° E) (Yogi Goswami, 2015). La información de los satélites

en actual funcionamiento se puede revisar en la web de NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Los instrumentos equipados en los tipos de satélites mencionados anteriormente poseen radiómetros de alta resolución recopilan imágenes de datos de radiación en la atmósfera de la Tierra continuamente. Estos radiómetros escanean mediciones espectrales en los rangos de longitud de onda de onda corta (0.2–3.0  $\mu\text{m}$ ), onda larga (6.5–25  $\mu\text{m}$ ) e irradiancia total (0.2–100  $\mu\text{m}$ ). La resolución espacial de las imágenes del satélite viene dada por un píxel, que representa el área de datos más pequeña, generalmente del orden de 2 km  $\times$  2 km. Sin embargo, se requieren varios píxeles de datos para obtener un valor de superficie que ofrezca una resolución de superficie del orden de 10 km  $\times$  10 km (Yogi Goswami, 2015).

#### *2.2.6.3.1. POWER Project data sets, NASA.*

POWER es una plataforma de observación y registros climáticos que provee conjuntos de datos solares y meteorológicos de la investigación de la NASA para apoyar estudios de energía renovable, construcción de eficiencia energética y necesidades agrícolas. Esta aplicación se utilizó para los datos de los puntos secundarios de medición.

Se ha demostrado que estos productos (Aplicativo POWER Release-8) basados en modelos y satélites son lo suficientemente precisos como para proporcionar datos fiables de recursos solares y meteorológicos en regiones donde las mediciones de superficie son escasas o inexistentes. Los productos ofrecen dos características únicas: los datos son globales y, en general, contiguos en el tiempo (Science's, 2003).

Los datos solares de POWER se basan en observaciones satelitales a partir de las cuales se infieren los valores de insolación superficial. Los parámetros meteorológicos se basan en el modelo de asimilación MERRA-2 (NASA, The POWER Project, 2003). Las fuentes de datos primarios solares y meteorológicos se producen de forma nativa en una cuadrícula de latitud/longitud global de 1°  $\times$  1° y se vuelven asignar a una cuadrícula de latitud/longitud de

0,5° x 0,5° mediante interpolación o replicación bilineal. Una vez que se procesan los datos, se archivan y se ponen a disposición a través del conjunto de servicios de POWER (NASA, The POWER Project, 2003).

#### ***2.2.6.4. Estación meteorológica automática.***

Una estación meteorológica automática (EMA) o hidrológica (EHA) es aquella que consta de sensores que registran variables hidrometeorológicas y las almacenan en una plataforma colectora de datos. Eventualmente transmiten en forma automática (tiempo real), de lo contrario se les denomina como “fuera de línea” (Ministerio del Ambiente & SENAMHI, 2013). La OMM (Organización Meteorológica Mundial) considera una estación automática como Sistema de Observación Automático. Estas estaciones deben ubicarse en lugares donde el registro de las variables a medir sea representativo de las condiciones atmosféricas típicas del área de monitoreo, siempre evitando sitios que tengan obstáculos alrededor de la estación que puedan afectar la medición correcta de las variables observadas (OMM, 1996).

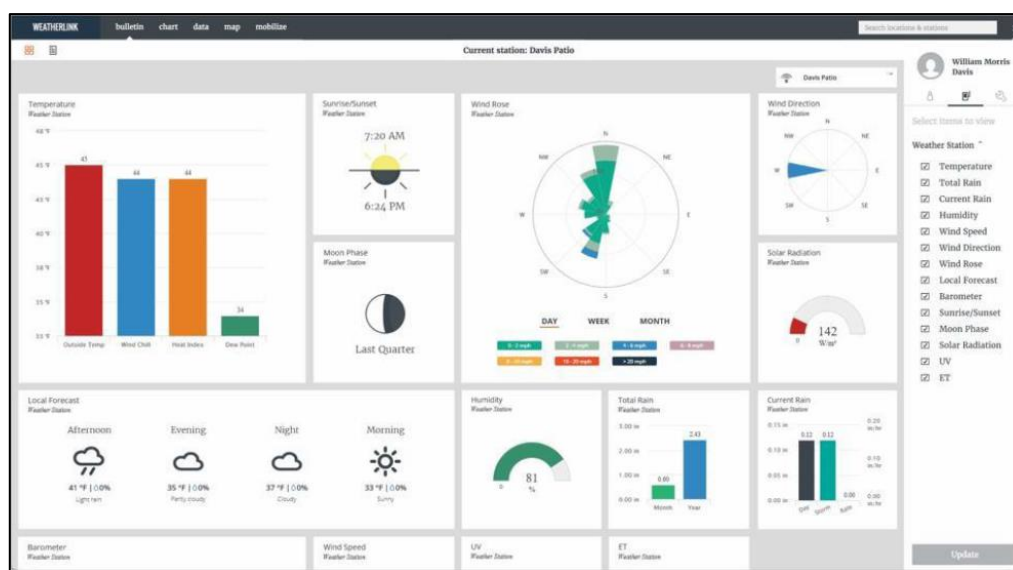
Para la investigación se utilizó una estación meteorológica automática particular de la serie Davis, la cual registró los datos terrestres obtenidos en el área de estudio. Dentro de los lineamientos otorgados por el SENAMHI en su guía de operación, esta EMA está clasificada como para propósitos específicos y subclasificada para investigación y fines especiales. Las observaciones climatológicas en este tipo de estaciones consideran los elementos de interés que persiguen de acuerdo a los objetivos específicos para lo que se diseñó (proyecto o actividad transitoria) (Ministerio del Ambiente & SENAMHI, 2013).

La instalación y operación de la estación meteorológica automática utilizada para la investigación cumple con todos los requerimientos y normas dispuestas para una estación meteorológica de propósitos específicos en el “Protocolo para la instalación y operación de estaciones meteorológicas, agrometeorológicas e hidrológicas” realizado por MINAM y SENAMHI.

#### 2.2.6.4.1. Software de aplicación Weatherlink 2.0.

Es un software para monitoreo de las variables climáticas registradas por la estación meteorológica en el área de aplicación (ver Figura 7). Permite almacenar en una base de datos la información registrada y visualizarla en tiempo real, además de permitir elaborar informes y graficas detalladas. El producto es desarrollado por Davis Instruments y contiene un datalogger para carga y descarga de datos meteorológicos (DAVIS, 2019).

*Figura 7 Interfaz del software Weatherlink*



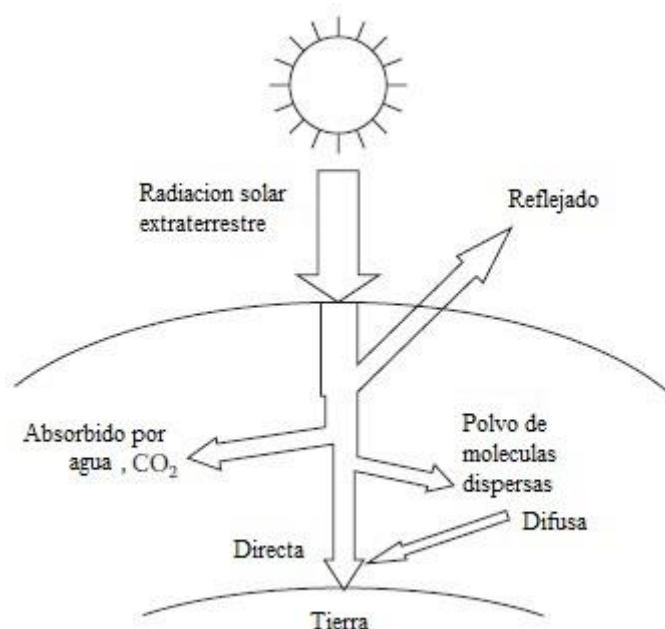
*Fuente: Davis Instruments.*

#### 2.2.7. Atenuación de la radiación solar por efectos atmosféricos.

La radiación solar es absorbida y dispersada por material atmosférico al pasar a través de la atmósfera terrestre, del cual aproximadamente el 99% está contenido dentro de una distancia de aproximadamente 30 km de la superficie terrestre. Además, el grado de absorción y dispersión de la radiación por la atmósfera depende de la longitud del camino atmosférico atravesado por el haz del sol y la composición de la atmósfera (Bayazitoğlu, 1987). Enfocando la investigación a la mecánica de fluidos, podemos denominar a la atmósfera de la tierra como un medio fluido que a su vez funciona de zona de tránsito para la radiación proveniente del espacio exterior, una zona por la cual a medida que la radiación solar extraterrestre la atraviese, una parte de ella se verá reflejada de nuevo en el espacio, otra parte será absorbida por el aire

y el vapor de agua, y otra parte será dispersada por moléculas de aire, vapor de agua, aerosoles y partículas de polvo (ver Figura 8). A este proceso se le conoce como atenuación de la radiación solar por efectos de la atmósfera o transmitancia atmosférica ( $\tau$ ).

**Figura 8** Atenuación de la radiación solar a medida que pasa a través de la atmósfera



*Fuente: Yogi Goswami, 2015.*

La radiación solar incidente recibida en la superficie de la tierra está sujeta a variaciones debidas al cambio en la radiación extraterrestre y puntualmente a dos fenómenos en específico: La dispersión atmosférica por moléculas de aire, agua y polvo y la absorción atmosférica por O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> (Iqbal, 1983).

Como señala Duffie & Beckman (2013), la dispersión de la radiación a medida que atraviesa la atmósfera es provocada por la interacción de la radiación con las moléculas de aire, el agua (gotas y vapor) y el polvo. El grado en que se produce la dispersión es una función de la cantidad de partículas a través de las cuales la radiación debe pasar y el tamaño de las partículas en relación con la longitud de onda de la radiación. Estas partículas de polvo y agua halladas por la radiación obedecen a las condiciones del tiempo, la masa de aire, humedad y cantidad de polvo presentes que dependen de la ubicación en la atmósfera.

Las moléculas de aire en relación con la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la radiación solar son diminutas. De acuerdo con la teoría de Rayleigh ocurre la dispersión cuando el coeficiente de dispersión varía con  $\lambda^{-4}$ , por lo que la dispersión de Rayleigh es significativa solo en longitudes de onda corta, por encima de  $\lambda = 0.6 \mu\text{m}$  el efecto sobre la transmitancia atmosférica es mínimo. Las moléculas de polvo y agua en la atmósfera suelen ser más grandes a consecuencia de la adición de moléculas de agua y la condensación de agua en partículas de polvo de varias dimensiones. Estos efectos resultan más complicados de tratar que los efectos de la dispersión de Rayleigh por las moléculas de aire, debido a que la naturaleza y la extensión de las partículas de polvo y humedad son muy variables con la ubicación y el tiempo en la atmósfera.

La absorción de radiación en la atmósfera en el espectro de energía solar se debe en gran medida al ozono en el ultravioleta, al vapor de agua y al dióxido de carbono en las bandas en el rango infrarrojo. Existe una absorción por el ozono prácticamente completa de la radiación de onda corta en la atmósfera superior a longitudes de onda por debajo de  $0.29 \mu\text{m}$ . Esta absorción de ozono se reduce a medida que la longitud de onda agrupada aumenta por encima de  $0.29 \mu\text{m}$ , llegando hasta  $0.35 \mu\text{m}$  donde la absorción es nula. Además, cerca de  $\lambda = 0.6 \mu\text{m}$  existe una banda de absorción de ozono débil.

En las bandas de la parte infrarroja del espectro solar el vapor de agua absorbe considerablemente, con fuertes bandas de absorción centradas en  $1.0$ ,  $1.4$  y  $1.8 \mu\text{m}$ . Más allá de  $2.5 \mu\text{m}$ , la transmisión de la atmósfera es menor debido a la absorción de  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CO}_2$ . La energía en el espectro extraterrestre a  $\lambda > 2.5 \mu\text{m}$  es menos del 5% del espectro solar total, y la energía recibida en el suelo a  $\lambda > 2.5 \mu\text{m}$  es muy pequeña (Duffie & Beckman, 2013).

De lo expuesto anteriormente se desprende que un análisis de la atenuación de la radiación solar que viaja a través de la atmósfera como resultado de la absorción y la dispersión es un proceso muy complejo, debido a la alta variabilidad en cada ubicación y tiempo. Es por ello que por medio de modelos de estimación empíricos basados en la amplitud térmica se pretende

evaluar todos estos efectos dentro de una constante llamada constante de transmitancia atmosférica, de manera que podamos clasificar la dinámica de nuestro medio fluido (atmósfera) en cualquier punto de aplicación.

De acuerdo con Yousif, Oña Quecedo, & Bilbao Santos (2013), la interpretación física de la transmitancia atmosférica ( $\tau$ ) se puede clasificar en rangos de la siguiente manera:

- Nublado:  $\tau = 0 - 0.2$
- Parcialmente nublado:  $\tau = 0.2 - 0.6$
- Soleado:  $\tau = 0.6 - 0.75$
- Muy soleado:  $\tau = 0.75 - 1$

En el Perú, la transmitancia atmosférica se ve afectada principalmente por los controles climáticos, como las celdas semipermanentes de alta presión sobre los océanos Pacífico y Atlántico, la alta boliviana (una celda de alta presión en los niveles superiores de la tropósfera), el valle ecuatorial, el frío Humboldt o corriente peruana, y la cordillera de los Andes. La interacción de estos controles junto con el movimiento aparente del sol de un hemisferio a otro, afectan a la transmitancia atmosférica y conforman un complejo patrón de radiación solar incidente que no solo corresponde a efectos de altitud y latitud. Por lo que se debe tener en cuenta que en terrenos de montaña no es posible utilizar generalizaciones que se puedan aplicar en condiciones más homogéneas (Baigorria, Villegas, Trebejo, Carlos, & Quiroz, 2004).

#### **2.2.8. Modelos de estimación.**

De acuerdo con Yogi Goswami (2015), la información detallada sobre la disponibilidad de radiación solar en cualquier ubicación es primordial para el diseño y la evaluación económica de un sistema a base de energía solar. El registro de datos medidos a largo plazo de la radiación solar está disponible para la gran mayoría de ubicaciones alrededor del mundo. Por otro lado, menciona que cuando no se dispone de datos medidos a largo plazo, se pueden utilizar varios



modelos basados en los datos climáticos disponibles para estimar la disponibilidad de energía solar.

A lo largo de los últimos años se han desarrollado distintos tipos de modelos para calcular la radiación solar, sea para estimar el valor en zonas donde no se registra adecuadamente o porque no se dispone de herramientas para medirla. Durante la evaluación de los distintos estudios revisados para esta tesis, se ha identificado la variedad de tipos de modelos con los que suele trabajar la comunidad científica. Por lo que, contrastando la metodología y el tipo de algoritmo utilizado, los podemos distinguir en dos clases: físicos y estadísticos.

Según Meizoso López (2012), los primeros se basan exclusivamente en consideraciones físicas del intercambio de energía que tiene lugar en el sistema Tierra-atmósfera, es decir, toman en cuenta las interacciones de la radiación solar con la atmósfera terrestre, por lo que tratan de estimar la irradiación solar que se recibe en la superficie en términos de un conjunto de parámetros físicos como la dispersión atmosférica por moléculas de aire, agua y polvo, y la absorción atmosférica por ozono, vapor de agua y CO<sub>2</sub>. Por otra parte, los modelos estadísticos relacionan la irradiancia normal directa con otras mediciones de radiación solar, especialmente la irradiancia solar global en una superficie horizontal, utilizando expresiones empíricas simples, tanto para condiciones despejadas como nubladas. De esta forma, estos modelos evitan las dificultades asociadas con la parametrización del efecto radiativo de la nube (López, Rubio, & Batlles, 2000).

Para la aplicación de los primeros, se requiere de cierta cantidad de información en cuanto a cada parámetro de entrada, tales como albedo, dispersión de moléculas de aire, contenido de vapor de agua, dispersión de polvo, etc. (Almorox, Bocco, & Willington, 2013). Es decir, información atmosférica necesaria que a menudo no se mide en estaciones meteorológicas y otros que resultan de realizar investigaciones adicionales, por lo cual dificulta su aplicación (López, Rubio, & Batlles, 2000). Por el contrario, para los segundos, donde utilizan parámetros

de entrada de común registro como presión atmosférica, duración de la luz solar, temperatura del aire, temperatura del suelo, humedad relativa, evaporación, precipitación, número de días lluviosos, agua precipitable total, etc. (Almorox, Bocco, & Willington, 2013). Estos modelos surgieron como herramienta principal para alcanzar metas inmediatas de los sistemas de conversión de energía solar, convirtiéndose así en un campo autónomo de la investigación de energía solar (Meizoso López, 2012).

Desde el trabajo de Angstrom, los modelos para estimar la radiación solar global a partir de la duración de la luz solar han sido los más utilizados. Las estimaciones de estos modelos son muy útiles y más precisas. Desafortunadamente los registros de duración de la luz solar no están disponibles en la mayoría de las estaciones meteorológicas, lo que indica que la aplicación de los modelos basados en la luz solar es bastante limitada (Li, Cao, Bu, & Zhao, 2015).

En el Perú, incluso con la facilidad que otorgan los modelos estadísticos que utilizan parámetros de común registro como entrada para su aplicación, no todas las estaciones meteorológicas los miden en su totalidad. Sin embargo, se han realizado estudios utilizando algunos de ellos, por ejemplo, el Atlas de Energía Solar del Perú (2003), el cual se formuló en base a los modelos de Angstrom-Prescott y Bristow-Campbell, que estiman la radiación solar mediante la duración de la luz solar y la temperatura del aire respectivamente. En ese contexto, podemos afirmar que los modelos de estimación de la radiación solar basados en la temperatura del aire se presentan como una opción atractiva y sobre todo viable.

Los modelos basados en temperatura utilizan la temperatura del aire máxima y mínima para estimar la atenuación por efecto de la atmósfera. Estos modelos suponen que la temperatura máxima disminuirá con una transmisividad reducida, mientras que la temperatura mínima aumentará debido a la emisividad de la nube. En caso de cielos despejados aumentarán la temperatura máxima debido a una mayor radiación de onda corta, y la temperatura mínima

disminuirá a consecuencia de una mayor transmisividad; entonces la diferencia entre las temperaturas diarias máximas y mínimas del aire se convierte en un indicativo de nubosidad (Almorox, Bocco, & Willington, 2013).

De acuerdo con Bristow & Campbell (1984), el tamaño de la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas diarias del aire depende de la relación entre el calor sensible y el calor latente. El calor sensible depende de la radiación solar que ingresa diariamente y es responsable de las temperaturas máximas del aire. Por la noche, el calor sensible se pierde en el espacio como la radiación de onda larga; junto con los flujos de radiación, esto resulta en una disminución de la temperatura del aire hasta que se alcanza la temperatura mínima diaria, generalmente antes del amanecer. Con esta aclaración física se justifica la utilización de este tipo de modelos, con la ventaja obtenida por el uso de una amplia red de estaciones meteorológicas que permiten realizar mediciones de temperaturas diarias extremas.

En esta investigación, se consideró tres alternativas de cálculo para la estimación de la radiación solar en base a la amplitud térmica, las cuales se describen a continuación:

#### **2.2.8.1. Modelo de Bristow-Campbell.**

Bristow & Campbell (1984), propusieron un modelo con el cual estimar la radiación solar entrante relativa en función de la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ):

$$\frac{H}{H_0} = a_B * [1 - e^{(-b_B * \Delta T^{c_B})}] \quad (2.14)$$

$$c_B = 2.116 - 0.072 (T_{max} - T_{min}) + 57.574 * e^{\varphi} \quad (2.15)$$

$$b_B = 0.107 * c_B^{-2.6485} \quad (2.16)$$

Donde:

$H$  = Radiación solar global [ $\text{kWh/m}^2$ ]

$H_0$  = Radiación solar extraterrestre [ $\text{kWh/m}^2$ ]

$T_{max}$  = Temperatura máxima [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\min}$  = Temperatura mínima [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Los coeficientes empíricos ( $a_B$ ,  $b_B$  y  $c_B$ ) poseen descripción física. El coeficiente  $a_B$  representa el máximo valor de la transmitancia atmosférica, que es característico de un área de estudio, que a su vez depende de la contaminación y la elevación. Los coeficientes  $b_B$  ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) y  $c_B$  determinan el efecto de los incrementos en  $\Delta T$  en el valor máximo de la transmitancia atmosférica (Meza & Varas, 2000).

#### **2.2.8.2. Modelo de Hargreaves.**

Hargreaves & Samani (1982), propusieron una ecuación empírica que tomó la forma de un modelo de regresión lineal entre la radiación solar entrante relativa y la raíz cuadrada de  $\Delta T$ :

$$\frac{H}{H_0} = a * (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \quad (2.17)$$

Donde:

$a$  = Es el coeficiente empírico de ajuste, que representa la transmitancia atmosférica.

$H$  = Radiación solar global [ $\text{kWh/m}^2$ ]

$H_0$  = Radiación solar extraterrestre [ $\text{kWh/m}^2$ ]

$T_{\max}$  = Temperatura máxima [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\min}$  = Temperatura mínima [ $^{\circ}\text{C}$ ]

#### **2.2.8.3. Modelo de Annandale.**

La radiación solar estimada por el modelo de Annandale es una modificación del modelo de Hargreaves y Samani, que se corrigió según la altitud. El coeficiente “ $a$ ” del modelo H-S es igual a  $A * (1 + 2.7 * 10^{-5} * Z)$  (Annandale, Benadé, & Allen, 2002).

El modelo de Annandale se puede escribir de la siguiente manera:

$$\frac{H}{H_0} = A * (1 + 2.7 * 10^{-5} * Z) (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \quad (2.18)$$

Donde:

$A$  = Representa el valor máximo de la transmitancia atmosférica

$Z$  = La altura en metros sobre el nivel del mar donde se encuentra el punto de medición.

$H$  = Radiación solar global [ $\text{kWh/m}^2$ ]

$H_0$  = Radiación solar extraterrestre [ $\text{kWh/m}^2$ ]

$T_{\max}$  = Temperatura máxima [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\min}$  = Temperatura mínima [ $^{\circ}\text{C}$ ]

### **2.2.9. Método de interpolación**

La interpolación espacial es especialmente importante en regiones montañosas donde la recolección de datos es escasa y las variables pueden cambiar en distancias cortas (Baigorria & Bowen, 2001). Esta puede predecir valores en ubicaciones desconocidas y crear superficie a partir de los puntos medidos circundantes. Sin embargo, el problema principal es que requiere puntos suficientes y, por lo tanto, es limitado ya que las estaciones de medición de radiación solar son espacialmente muy escasas (Chen & Li, 2012). Existe una amplia cantidad de métodos de interpolación disponibles dependiendo del recurso del cual estimar. En su mayoría son de aplicación compleja debido a la susceptibilidad de sus parámetros para el ajuste de cada uno de ellos, es decir, los valores obtenidos en cada proceso de interpolación dependen de varios factores como, las características geográficas analizadas, la muestra disponible, las variables asociadas con la distribución de los datos y la resolución espacial requerida (Martín & Dominguez, 2019). La selección de un procedimiento dependerá del objetivo del estudio y la información disponible.

Dentro de la literatura investigada, según Burrough, McDonnell, & Lloyd (2015), los modelos que pueden aplicarse en la interpolación de datos de radiación solar se clasifican de distintas maneras: deterministas y geoestadísticas, globales y locales, y exactos e inexactos (ver Tabla 2).

**Tabla 2:**  
*Métodos de interpolación espacial*

Método	Tipo de Interpolación	Local/Global	Interpolación Exacta
Polinomio Global	Determinista	Global	No
Polinomio Local	Determinista	Local	No
Distancia Inversa Ponderada	Determinista	Local	Si
Funciones de Base Radial	Determinista	Local	Si
Kriging	Geoestadística	Local con tendencia global	Si
Cokriging	Geoestadística	Local con tendencia global	Si

Fuente: Burrough, McDonnell, & Lloyd (2015).

Los modelos deterministas crean superficies interpoladas basadas en el ajuste de funciones matemáticas a los puntos medidos y definen un conjunto de variables explicativas para que los errores sean mínimos, mientras que las geoestadísticas generan las superficies de predicción utilizando modelos estadísticos, además cuantifican la correlación espacial de los datos y evalúan la incertidumbre de los resultados obtenidos. Los modelos consideran exactos cuando los valores interpolados para una ubicación corresponden a los datos medidos. Por último, los modelos globales utilizan una única función para crear la superficie continua a partir de todos los valores de muestra y las interpolaciones locales ajustan la función a diferentes áreas pequeñas de los puntos de muestra (Martín & Dominguez, 2019).

De los métodos mencionados, se destaca el método de Kriging como el más óptimo y de mayor aplicación en el campo para la interpolación de la radiación solar. Kriging es una técnica de alta fidelidad que se puede aplicar al modelado de recursos solares en ubicaciones no observadas (Martín & Dominguez, 2019). Este método solo sería útil para una escala espacial y temporal por debajo de lo que pueden lograr los satélites hoy en día (Perez, et al., 2016).

### ***2.2.9.1. Modelado de la radiación solar mediante SIG***

Los sistemas de información geográfica (SIG) proporcionan diferentes opciones para analizar y representar la heterogeneidad espacial de la radiación solar incidente en un área determinada. A escalas regionales y locales, la altitud, la orientación, la pendiente y el sombreado pueden generar microclimas y una distribución más o menos homogénea de la radiación solar (Martín & Dominguez, 2019).

Existen diferentes paquetes de software SIG que contienen métodos para estimar la radiación solar. El método de interpolación Kriging, utilizado en esta investigación se encuentra en el software libre QGIS, el cual incorpora la posibilidad de incluir el efecto de sombreado debido a la topografía y un factor de atenuación de las nubes. Esta herramienta pertenece a un módulo aplicativo de SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses), representa y analiza la radiación durante un período de tiempo en un área geográfica representada por un archivo ráster de terreno (Modelo de elevación digital - DEM). El resultado del análisis es la radiación solar global para cada ubicación de una superficie. Está diseñado para trabajar en escalas locales porque solo define un valor de latitud para toda el área.

### ***2.2.9.2. Simulación***

La simulación utiliza el modelo digital de elevación (DEM) de todo el territorio de aplicación, generando la imagen RASTER a partir de complementos del mismo software delimitados por las cartas descargadas del “Geo servidor” del Ministerio del Ambiente, con resolución espacial de 30 metros. Se consideró clasificar los puntos de observación en principal (1) y auxiliares (16). Los cuales reportan la información medida por la estación meteorológica automática (durante un periodo de 10 meses) y los datos extraídos (histórico de 9 años) desde el aplicativo POWER Data Access de la NASA respectivamente. Estos puntos auxiliares se seleccionaron bajo el criterio de zonas de similar condición a la ubicación de registro de la estación meteorológica automática. La elección de zonas homogéneas a la del punto de

observación principal beneficia también al método de interpolación, lo que proporciona una metodología objetiva para el trazado de cartas con la distribución espacial del recurso solar. Este procedimiento se realizó a nivel mensual, anual y estacional para generar los mapas de radiación incidente en todo el distrito.

### 2.2.10. Rentabilidad del Potencial Solar.

El Perú posee tres grandes regiones naturales: Costa, Sierra y Selva, las cuales poseen características singulares debido a sus condiciones climáticas y topográficas variables, en consecuencia, se ve afectada la distribución espacial y temporal de la radiación solar incidente. Esta distribución en todo el territorio fue determinada por el SENAMHI en el “Atlas de Energía Solar del Perú” (ver Tabla 3), donde se detalló por rangos estimados la cantidad de energía solar recibida en cada región aproximadamente.

**Tabla 3:**

*Distribución anual de la radiación solar incidente diaria promedio en el Perú.*

Región	Radiación promedio (kWh/m <sup>2</sup> )		
	Norte	Centro	Sur
<b>Costa</b>	5.5 - 6	3.5 - 4.5	6 - 6.5
<b>Sierra</b>	5.5 - 6	5.5 - 6	5.5 - 6
<b>Selva</b>	4.5 - 5	4.5 - 5	4.5 - 5

Fuente: SENAMHI, Atlas de Energía Solar del Perú (2003).

Donde los valores estimados para la sierra son de zonas que se encuentren por encima de los 2500 m.s.n.m.

Vásquez & Lloyd (1987), determinó en su estudio valores correspondientes de radiación solar incidente para cada región del Perú, que fueron publicadas por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). La información registrada nos brinda un rango promedio estimado adicional a los propuestos por SENAMHI en las regiones naturales, para la región Lima (Ver Tabla 4), que es donde se ubica el distrito de San Mateo, lugar donde se realizó la investigación.



**Tabla 4:**  
*Media Anual de la Radiación Solar Diaria en el Lima.*

<b>Región</b>	<b>Provincia</b>	<b>Distrito/Localidad</b>	<b>Irradiación diaria media anual (kWh/m<sup>2</sup>)</b>
Lima	Barranca	Paramonga	3.83
Lima	Cañete	San Vicente de Cañete	4.28
Lima	Chancay	Andahuasi - Bayan	5.14
Lima	Chancay	Humaya - Huaura	4.66
Lima	Chancay	Pumacahua	4.23
Lima	Lima	Jesús María	3.81
Lima	Lima	La Molina	3.31

Fuente: OLADE (1987).

Por su parte el Atlas de Energía de Solar del Perú, desarrollado por SENAMHI, también indica valores promedios por región, en la Tabla 5 se puede visualizar el registro promedio anual por todas las estaciones en la región Lima.

**Tabla 5:**  
*Media Anual de la Radiación Solar Diaria en el Lima.*

<b>Región</b>	<b>Provincia</b>	<b>Nombre de Estación</b>	<b>Irradiación diaria media anual (kWh/m<sup>2</sup>)</b>
Lima	Huachirí	Matucana	4.30
Lima	Huaura	Alcantarilla	5.20
Lima	Huaura	Camay	4.60
Lima	Huaura	Lomas de Lachay	4.30
Lima	Huaura	Picoy	5.00
Lima	Lima	A. Von Humboldt	5.00
Lima	Lima	Modelo	4.30

Fuente: SENAMHI, Atlas de Energía Solar del Perú (2003).

Según OLADE, el Perú es un país con un potencial solar promedio estimado de 4.5 kWh/m<sup>2</sup> al año y se estima que la radiación solar es rentable a partir de los 4 kWh/m<sup>2</sup> y muy rentable a partir de los 5 kWh/m<sup>2</sup>.

## Capítulo 3: Marco Metodológico

### 3.1. Área de Estudio

#### 3.1.1. Descripción.

San Mateo es uno de los 32 distritos pertenecientes a la provincia de Huarochirí en el departamento de Lima, bajo la dirección del Gobierno Regional de Lima-Provincias, Perú (ver Figura 9). Posee una superficie total de 426 km<sup>2</sup>, por el cual atraviesa el cauce del río Rímac. Sus límites son por el norte el distrito de Chicla, por el sur el distrito de San Miguel de Viso, por el este el distrito de Tamboraque y por el oeste con una cadena montañosa repleta de vegetación.

La alta variabilidad en su topografía se ve reflejada a medida que se recorre el distrito. Se observó desde abundantes árboles en la parte baja hasta un relieve accidentado en la parte alta, correspondiente a una pradera con pajonales extensos y arbustos. Además, en el camino o trocha hacia el área de medición se cruzan quebradas, que en temporada de lluvia provocan deslizamientos obstaculizando el acceso frecuentemente.

#### 3.1.2. Localización.

El área de estudio se encuentra entre las coordenadas UTM WGS-84: 374388 E y 8689191 N, zona 18 Sur, a una altitud de 4458 m.s.n.m. aproximadamente. Que corresponde a la zona de registro principal de medición (ver Figura 10). Los puntos auxiliares de medición (ver Figura 11) están descritos en la Tabla 6:

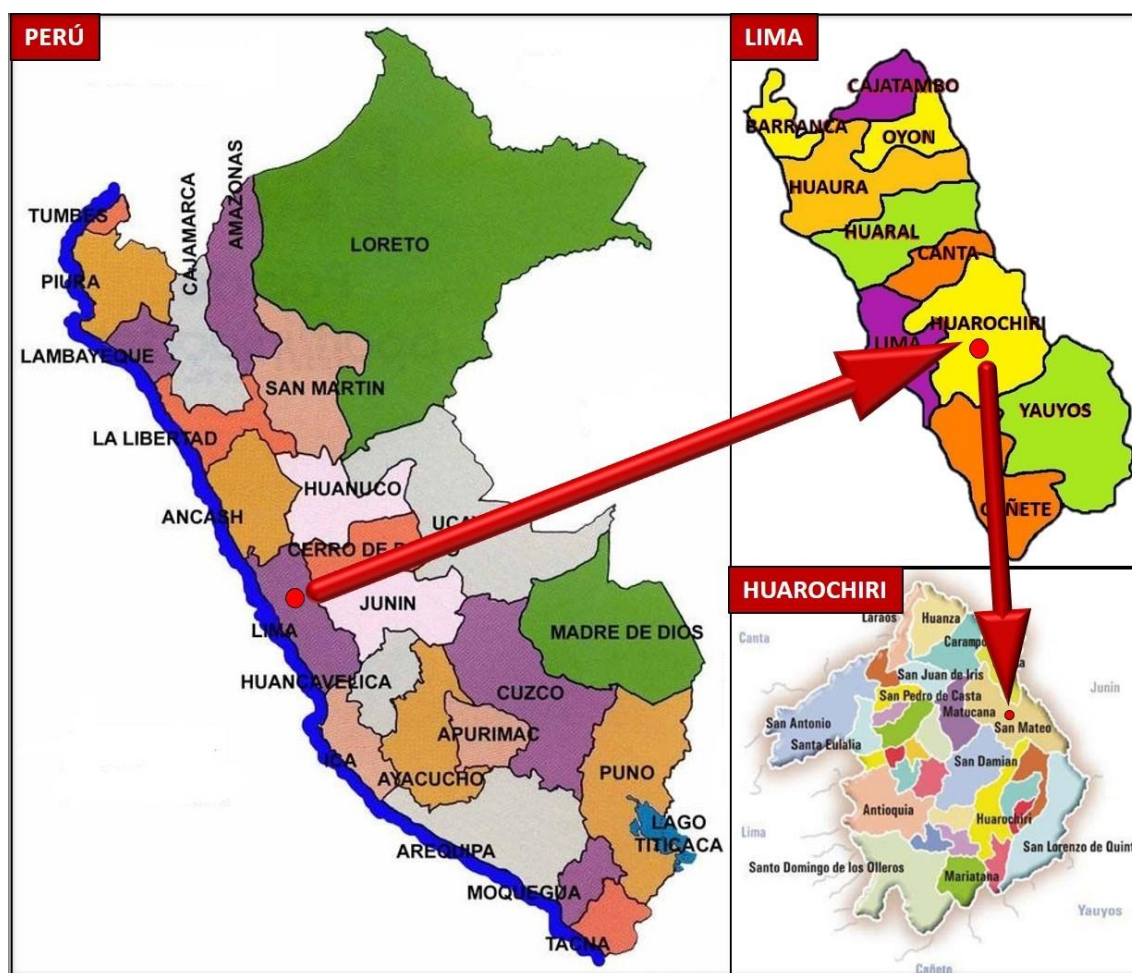
**Tabla 6:**  
*Puntos Auxiliares de Medición*

Puntos auxiliares	Coordenadas UTM WGS-84 Zona 18S		
	Este	Norte	Elevación
1	357871	8704559	4263
2	355648	8694516	3112
3	351795	8699513	3362
4	360060	8700464	3680

Puntos auxiliares	Coordenadas UTM WGS-84 Zona 18S		
5	358335	8709257	5159
6	361146	8694990	3704
7	364804	8697515	3931
8	362822	8691189	4510
9	368356	8690169	4407
10	366963	8685627	4568
11	372902	8695307	4348
12	377295	8692089	4506
13	379004	8688224	4701
14	379368	8682156	4913
15	385683	8684172	5579
16	383773	8680856	5511

Fuente: Elaboración propia.

*Figura 9 Macro localización del área de estudio.*



Fuente: Elaboración propia.

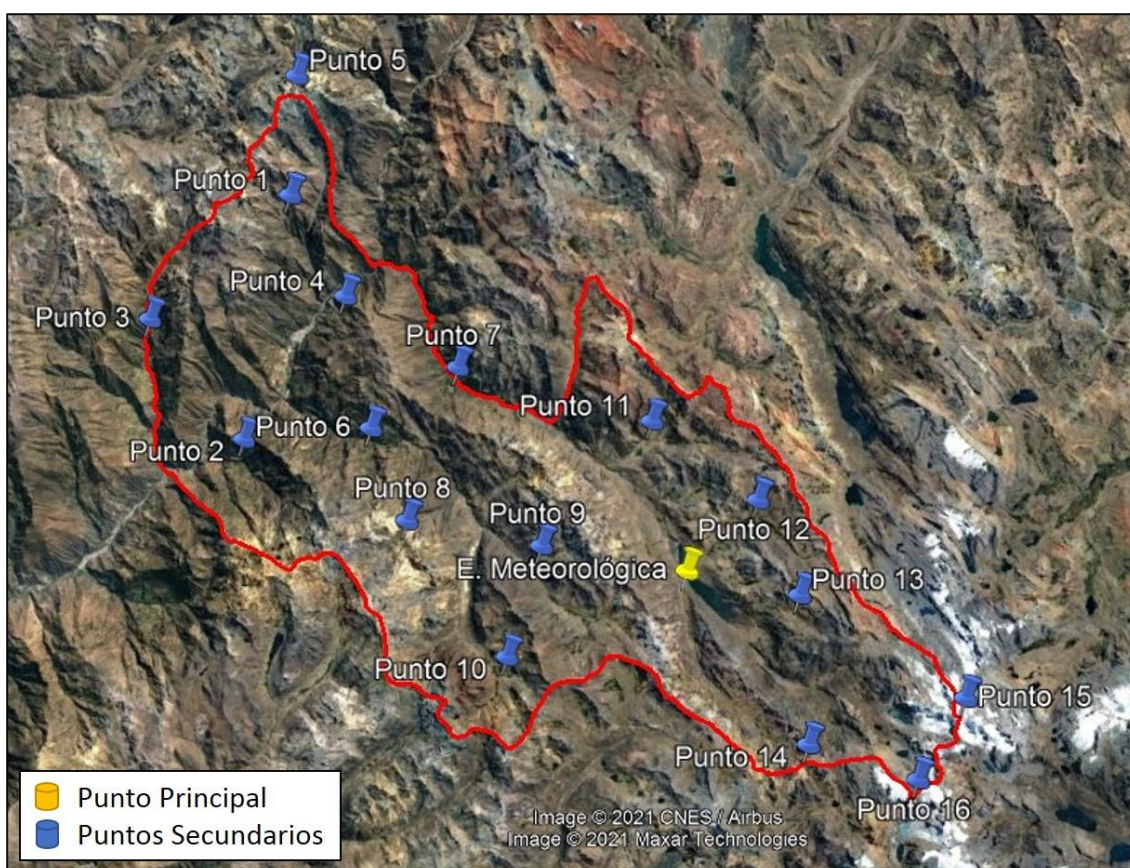


**Figura 10** Micro localización del área de registro de medición principal



Fuente: Google Earth. Elaboración propia.

**Figura 11** Macro localización del área de registro de mediciones secundarias.

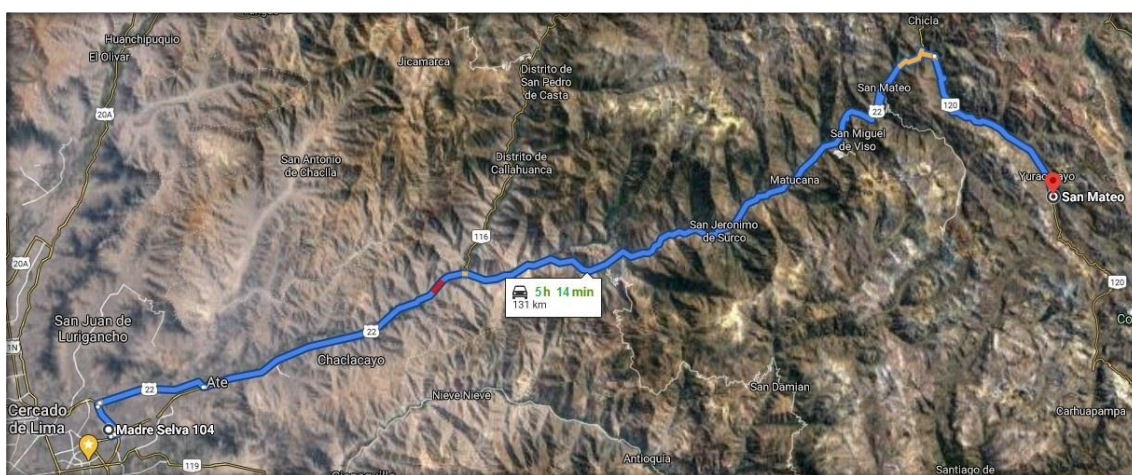


Fuente: Google Earth. Elaboración propia.

### 3.1.3. Accesibilidad.

Para llegar hasta el punto donde se realizaron las mediciones, se debe tomar la carretera central tomando como referencia el inicio de la ruta el centro de Lima. El recorrido por la carretera va hasta el kilómetro 101 donde se toma el desvío por la trocha carrozable LM-120 o desvío Río Blanco para llegar al destino. El total de recorrido es de 131 km, que aproximadamente son entre 4-5 horas de viaje (Ver Figura 12).

*Figura 12 Trayecto hacia el área de estudio.*



*Fuente: Google Maps. Elaboración propia.*

### 3.1.4. Clima.

El distrito de San Mateo ubicado en la sierra de Lima, en la cuenca alta del río Rímac, posee un clima propio de regiones altoandinas, donde la variación de temperatura se percibe con gran diferencia entre el día y la noche. La temperatura promedio varía generalmente de -3 a 13 °C (NASA, 2019) aproximadamente en el transcurso del año, teniendo temporadas de clima cálido (diciembre - abril) hasta temporadas de clima frío (junio - septiembre). Es por ello que sus estaciones como el verano son fríos, nublados y lluviosos, mientras que en invierno son muy fríos, secos y parcialmente nublados. Según SENAMHI, en su Mapa Climático del Perú, al distrito de San Mateo le corresponde el clima lluvioso semi frígido o también llamado de Tundra, que se presenta en altitudes de 3500 – 6000 msnm. Este clima se caracteriza por poseer



temperaturas medias anuales de 7 °C, precipitaciones anuales promedio de 700 mm y nieve perpetua en alta montaña.

El nivel de humedad en San Mateo no varía considerablemente a lo largo del año, su temporada de lluvia va desde diciembre hasta marzo, el resto del año permanece prácticamente seco; y en cuanto a la radiación incidente que llega a la superficie del distrito, tiene una variación de 4.5 – 6.5 kWh (NASA, 2019) promedio mensual aproximadamente, lo que significa que son niveles óptimos para desarrollo de tecnologías a base de energía solar según OLADE (Organización Latinoamericana de Energía).

El lugar donde se realizaron las mediciones de las variables climáticas para la investigación se encuentra en la parte alta del distrito, aproximadamente entre los 4458 m.s.n.m., siendo este lugar habitado por la Comunidad Campesina San Antonio U.P. Cashapata.

### 3.1.5. Población

Según el Censo 2017 realizado por el INEI, las características de la población en el distrito de San Mateo se visualizan en las siguientes tablas:

**Tabla 7:**  
*Población de San Mateo por edad*

Población por edades	
Adulto (31-93)	1 093
Joven (14-30)	1 227
Niño (0-13)	2 137
Total	4 457

Fuente: REDATAM, Censos 2017, INEI.

**Tabla 8:**  
*Población de San Mateo por sexo*

Población por sexo	
Hombre	2 268
Mujer	2 189
Total	4 457

Fuente: REDATAM, Censos 2017, INEI.

### 3.1.6. Vivienda

Según el Censo 2017 realizado por el INEI, las características de las viviendas en el distrito de San Mateo se pueden ver en las siguientes tablas:

**Tabla 9:**  
*Número de viviendas en San Mateo*

Número de viviendas	Casos
Urbano	1 312
Rural	584
Total	1 896

Fuente: REDATAM, Censos 2017, INEI.

**Tabla 10:**  
*Tipo de vivienda en San Mateo*

Tipo de vivienda	Casos
Casa Independiente	1 754
Departamento en edificio	15
Vivienda en quinta	33
Vivienda en casa de vecindad (Callejón, solar o corralón)	22
Choza o cabaña	40
Local no destinado para habitación humana	7
Viviendas colectivas	25
Total	1 896

Fuente: REDATAM, Censos 2017, INEI.

### 3.2. Tipo, Nivel y Diseño de la Investigación

#### 3.2.1. Tipo de investigación.

Según su enfoque esta investigación es cuantitativa (Hernández Sampietri, 2014), ya que se utilizó la recolección de datos como los parámetros de temperatura y radiación, para probar la hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico para establecer patrones de comportamiento. A su vez, la investigación es básica según Espinoza Montes (2010), debido a que su propósito es la de ampliar el conocimiento científico a partir de la observación de los parámetros climatológicos y el comportamiento de estos fenómenos.

### **3.2.2. Nivel de la investigación**

La investigación es de nivel descriptivo, porque consiste en caracterizar los parámetros climatológicos como temperatura y radiación con el fin de establecer su comportamiento, ya que según Hernández Sampietri (2014) nos dice que el nivel descriptivo consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con la finalidad de establecer su estructura o comportamiento. Así mismo, es de nivel correlacional porque evalúa la relación entre dos o más variables (temperatura - radiación) e intenta explicar cómo se comporta una variable en función de las otras (Arias Odón, 2006).

### **3.2.3. Diseño de la investigación.**

Es un estudio no experimental según Hernández Sampietri (2014), porque no hay manipulación o control de las variables (temperaturas) y longitudinal porque se toma una muestra del objeto de investigación, la misma que es evaluada en distintos momentos en el tiempo y por periodos prolongados (Espinoza Montes, 2010).

## **3.3. Población y Muestra**

Para efectos de esta investigación, la población se considera a los eventos desarrollados dentro de las horas de medición y registro de datos donde hay mayor exposición solar (6am – 6pm) durante todo el periodo de la investigación. Mientras que la muestra es el promedio de los datos de los parámetros medidos dentro del rango establecido en la población (10 meses).

## **3.4. Selección de la Muestra**

Se determina mediante un muestreo no probabilístico intencional (Arias Odón, 2006) con filtro riguroso para la búsqueda de parámetros que se encuentren dentro de los valores promedios máximos y mínimos (temperaturas y radiación) de acuerdo a las condiciones climáticas del área de estudio, con las condiciones desarrolladas en el transcurso de cada día, habitualmente dentro del rango de mayor exposición solar.



### 3.5. Técnicas de Recolección de Datos

Se utilizó la técnica documental propuesta por Espinoza Montes (2010), para la creación de la base de datos obtenida del aplicativo POWER realizado por la NASA y la técnica instrumental expuesta por Hernández Sampietri (2014), utilizando la instrumentación (Estación meteorológica) que permite acumular y sistematizar información sobre las variables (temperaturas y radiación) de la investigación.

### 3.6. Análisis e Interpretación de la Información

#### 3.6.1. Técnica de análisis de datos.

De Espinoza Montes (2010), la técnica utilizada según el diseño de investigación que se realizó es la de análisis de datos, de las cuales se utilizó la estadística descriptiva y pruebas paramétricas.

##### 3.6.1.1. Estadística descriptiva.

Este análisis estadístico descriptivo permite la representación de los valores medidos y estimados en distribuciones de medidas de dispersión y correlación. La forma de cómo están esparcidos los datos de una distribución lo indican estas medidas (Espinoza Montes, 2010).

Además, para la evaluación de la aplicación y calidad de los modelos, se precisa el uso de indicadores estadísticos (Iqbal, 1983).

- Ecuación de la raíz del error cuadrático medio (**RMSE**):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (H_m - H_c)^2} \quad (4.1)$$

- Ecuación del error medio sesgo o BIAS (**MBE**):

$$MBE = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (H_m - H_c) \quad (4.2)$$

- Ecuación del error absoluto sesgo (**MABE**):

$$MABE = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (|H_m - H_c|) \quad (4.3)$$

- Ecuación del error porcentual (**MPE**):

$$MPE = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \left( \frac{H_m - H_c}{H_m} \right) * 100 \quad (4.4)$$

- Ecuación del error absoluto porcentual promedio (**MAPE**):

$$MAPE = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \left( \left| \frac{H_m - H_c}{H_m} \right| \right) * 100 \quad (4.5)$$

- Error relativo (**E%**):

$$E\% = \left( \frac{H_m - H_c}{H_m} \right) * 100 \quad (4.6)$$

- Coeficiente de Determinación (**R<sup>2</sup>**):

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (H_c - \bar{H}_c)(H_m - \bar{H}_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_c - \bar{H}_c)^2 * \sum_{i=1}^n (H_m - \bar{H}_m)^2}} \right)^2 \quad (4.7)$$

Donde el valor es “**R<sup>2</sup>**” esta expresado en porcentaje. Además:

H<sub>m</sub>: Radiación solar medida

H<sub>c</sub>: Radiación solar calculada

### 3.6.1.2. Pruebas paramétricas.

Las pruebas estadísticas paramétricas utilizadas para esta investigación son las siguientes:

- **Coeficiente de correlación “R” de Pearson:** Estima la relación por intervalos o de razón entre dos variables.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (H_c - \bar{H}_c)(H_m - \bar{H}_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_c - \bar{H}_c)^2 * \sum_{i=1}^n (H_m - \bar{H}_m)^2}} \quad (4.8)$$

- **Regresión lineal:** Aproxima el efecto de relación entre variables. Esto se asocia con el coeficiente de correlación.

$$y = ax + b \quad (4.9)$$

$$a = \bar{y} - b * \bar{x} \quad (4.10)$$

$$b = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum (x - \bar{x})^2} \quad (4.11)$$

### **3.7. Operacionalización de las Variables e Indicadores**

#### **3.7.1. Variable dependiente.**

##### **Radiación Solar**

- ✓ Disponibilidad en área de estudio.

#### **3.7.2. Variable independiente.**

##### **Temperatura**

- ✓ Temperaturas máximas y mínimas.

#### **3.7.3. Indicadores.**

- ✓ Temperatura máxima
- ✓ Temperatura mínima
- ✓ Latitud
- ✓ Día del año

### **3.8. Instrumentos y Procesamiento**

#### **3.8.1. Estación meteorológica DAVIS.**

Se utilizó una estación meteorológica automática de la serie Davis (ver Figura 13) propia del proyecto para la medición de la irradiación solar y parámetros que permitan el cálculo en los modelos de estimación. Dicha estación meteorológica es el punto principal de registro de datos. Además, un software (Weatherlink) con el que trabaja la estación meteorológica y que viene incluido dentro del paquete de productos Davis. Por último, una laptop para descarga de datos y su procesamiento.

**Figura 13** Estación meteorológica automática DAVIS Vantage Pro2 Plus



*Fuente: Elaboración propia.*

#### **Instalación:**

- Se procedió inicialmente la búsqueda de una ubicación adecuada y la limpieza del terreno.
- Posteriormente se siguió con el anclaje del trípode al terreno correspondiente al área de estudio. Se verificó que las estacas estén fijas, niveladas e inamovibles.
- Se colocó el parante en el trípode y se realizó el ajuste mediante abrazaderas.
- Se fijó el pluviómetro al parante a una altura aproximada de 1.5-2m al nivel del terreno. Se verificó que este nivelado a través de los niveladores de burbuja ubicados en los sensores de radiación solar y radiación UV.
- Se fijó el anemómetro al parante a una altura de 30cm por encima del pluviómetro.
- El anemómetro debe estar orientado hacia el hemisferio correspondiente al área de estudio (Perú – hemisferio sur).

**Recomendaciones:**

- No ubicar la estación meteorológica cerca de fuentes de calor ni ventilación de gases.
- No ubicar en zonas que estén valladas ni caminos de asfalto.
- No ubicar en zonas de abrigo, como cerca de árboles de parque o bosque.
- No ubicar en zonas de edificios o grandes estructuras.
- Ubicar en zonas fuera de lugares de escurrimiento.
- Ubicar en zonas con buena exposición solar.

**Medición:**

- Recopilación de datos de radiación solar y temperatura.
  - ✓ Se dispuso a realizar mediciones mediante una estación meteorológica propia para el proyecto, de la cual se recopiló los datos durante un periodo aproximado de 10 meses.

**Procesamiento:**

- Metodología del trabajo en campo.
  - ✓ Reconocimiento del área de estudio para la ubicación ideal de la estación meteorológica.
  - ✓ Instalación y calibración de la estación meteorológica propia.
  - ✓ Puesta en marcha de la estación meteorológica propia, control de su inspección y vaciado de datos cada 3-4 semanas aproximadamente.

**Análisis de Datos:**

- Metodología del trabajo de gabinete.
  - ✓ Se clasificó los datos obtenidos según la selección de la muestra, codificando por fecha y hora en plantillas diseñadas en hojas de cálculo de Excel.

- ✓ Tabulación de datos, de manera que sea posible disponer de estos en forma ordenada.

### **3.8.2. POWER Project data sets, NASA.**

Se recopiló una data histórica local para los puntos de observación planteados (principal y secundarios) a través de la plataforma POWER del área de estudio. Se extrajo registros de su base de datos para la medición de la radiación solar y parámetros que permitan el cálculo en los modelos de estimación.

#### **Medición:**

- Recopilación de datos de radiación solar y temperatura.
  - ✓ Se dispuso a descargar mediciones mediante la aplicación *POWER Data Access Viewer*, de la cual se extrajo una data histórica de un periodo mínimo de 9 años.

#### **Análisis de Datos:**

- Metodología del trabajo de gabinete.
  - ✓ Se clasificó los datos obtenidos mediante codificación por fecha en plantillas diseñadas en hojas de cálculo de Excel.
  - ✓ Tabulación de datos, de manera que sea posible disponer de estos en forma ordenada.
  - ✓ Se realizó la comparación con la información obtenida mediante la estación meteorológica y verificar el porcentaje de error, para finalmente considerarlo en la aplicación a los puntos secundarios.

## Capítulo 4: Presentación de Resultados

### 4.1. Elaboración de Base de Datos

Durante el periodo de registro o medición de parámetros, se descargó la base de datos de la estación meteorológica propia del proyecto utilizada en el área de estudio y de la aplicación web *POWER Data Access* de la NASA en los puntos georreferenciados (principal y secundarios) del distrito de San Mateo respectivamente. La información fue esencial para alimentar el proceso de los modelos de estimación utilizados como alternativas de cálculo para determinar el potencial solar del área del proyecto y la influencia de las variables climáticas para su obtención.

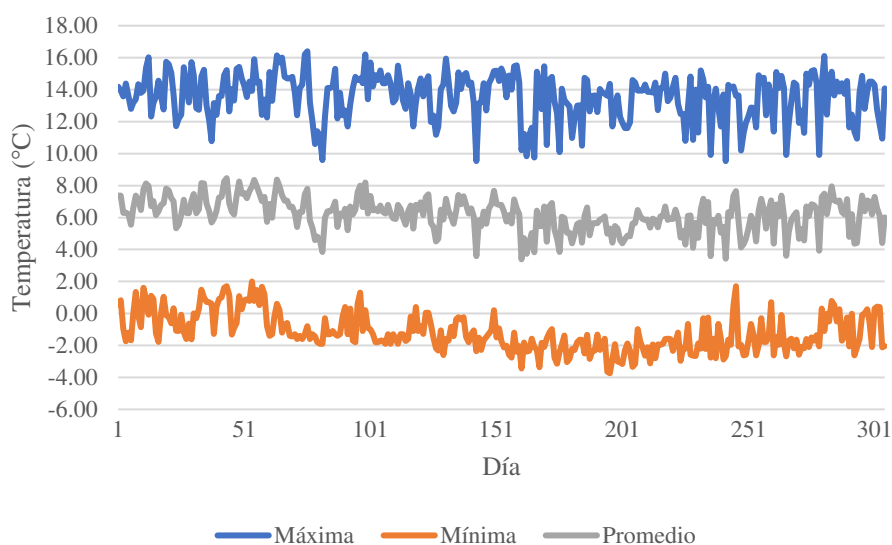
#### 4.1.1. Registro de Estación Meteorológica Automática DAVIS.

Con la finalidad de conocer el comportamiento de las variables a lo largo del periodo de estudio, se realizó el análisis estadístico de las mismas de tal manera que se visualice su influencia para la determinación del potencial solar.

##### 4.1.1.1. Registro de medición de temperatura.

En el periodo medición (enero - octubre) se obtuvo una temperatura promedio de 6.72 °C. En la Figura 14 se puede apreciar la variación de la temperatura en los primeros meses hasta abril correspondiente a un clima cálido en San Mateo, donde se alcanzó un valor máximo de 16.40 °C, registrada el 16 de marzo; mientras que el valor más bajo fue de -1.91 °C el 16 de abril. Por otro lado, se registró que en los meses de clima frío (junio - agosto) la temperatura alcanzó un valor máximo de 15.53 °C, registrada el 7 de junio y el valor más bajo fue de -3.74 °C el 14 de julio.

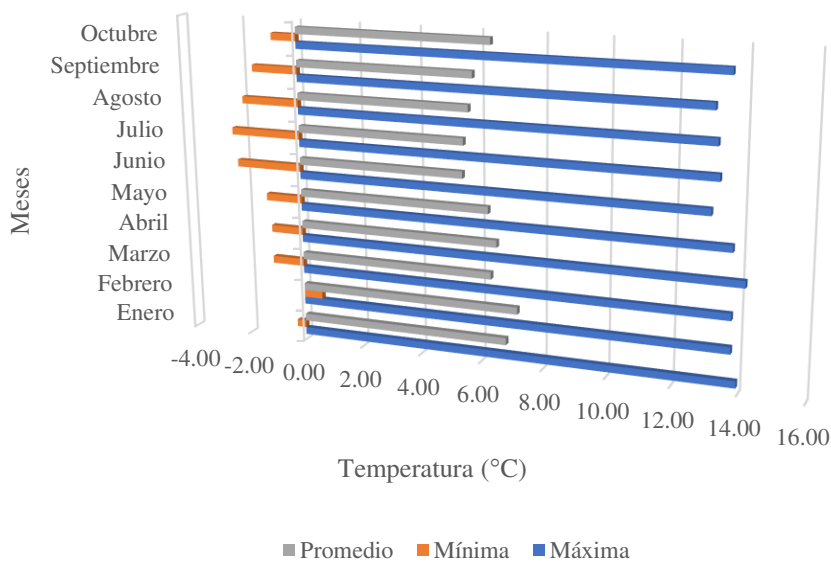
**Figura 14** Variación diaria de la temperatura en el periodo de medición.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 15 se puede visualizar las temporadas de clima cálido y frío en San Mateo, siendo el mes de mayo como un periodo de transición de una temporada a otra.

**Figura 15** Variación promedio mensual de la temperatura en el periodo de medición.



Fuente: Elaboración propia.

La temperatura durante el periodo de medición tuvo una variación promedio de -2.34 °C a 14.14 °C aproximadamente, promediando a lo largo de los meses de registro una temperatura

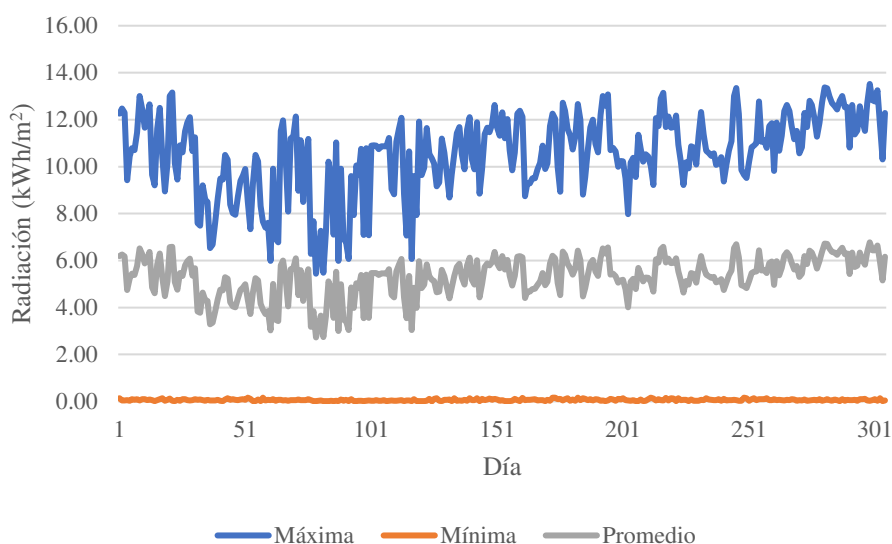


de 6.72 °C aproximadamente, que corresponde efectivamente al tipo de clima de Tundra, según el Mapa Climático de SENAMHI.

#### **4.1.1.2. Registro de medición de radiación.**

Durante el periodo medición (enero - octubre) se obtuvo una radiación incidente promedio de 5.31 kWh/m<sup>2</sup> día. En la Figura 16 se puede apreciar que la variación diaria de la radiación alcanzó un valor máximo de 13.52 kWh/m<sup>2</sup> día, registrada el 25 de octubre; mientras que el valor más bajo fue de 0.10 kWh/m<sup>2</sup> día el 19 de marzo.

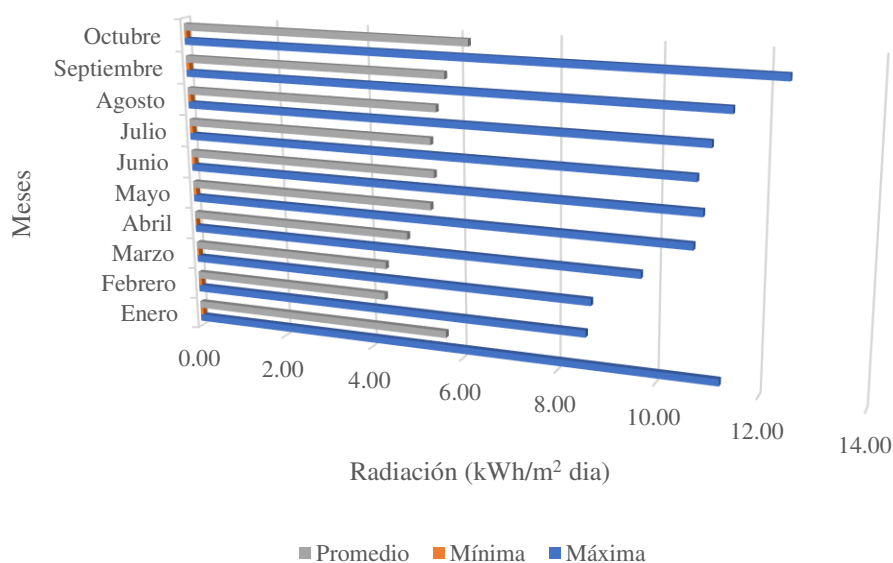
**Figura 16** Variación diaria de la radiación incidente en el periodo de medición.



*Fuente: Elaboración propia.*

Cabe mencionar que en el distrito de San Mateo los meses de mayor incidencia de radiación se da desde septiembre hasta enero; mientras que la de menor nivel de radiación se presentan desde febrero hasta mayo aproximadamente. En la Figura 17 indica dicha variación en los periodos donde la radiación es alta, media y baja.

**Figura 17** Variación promedio mensual de la radiación incidente en el periodo de medición.



*Fuente: Elaboración propia.*

La radiación mínima registrada corresponde en su mayoría, a las primeras horas dentro del rango establecido como selección de muestra para su evaluación. Es por ello que su variación va desde 0.1 kWh/m<sup>2</sup> hasta 0.33 kWh/m<sup>2</sup> aproximadamente.

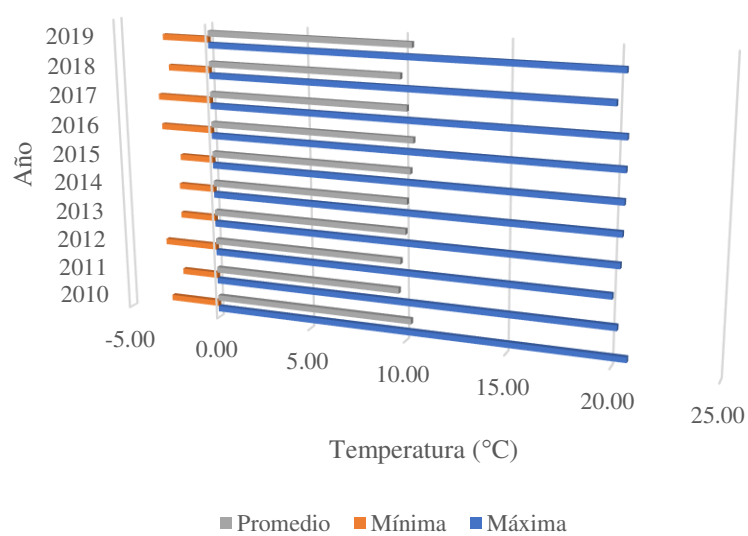
#### **4.1.2. Registro de base de datos extraída de NASA.**

A diferencia de la obtención de datos por la estación meteorológica, la cual registraba valores cada 30 minutos, la plataforma virtual de la NASA con su aplicación web POWER, solamente proporciona valores promedios medidos diarios, por lo cual para un análisis en condiciones favorables se extrajo una data histórica de 9 años.

##### **4.1.2.1. Registro de medición de temperatura.**

El periodo de datos descargados para su evaluación fue desde el 2010 hasta el 2019, dejando el 2020 para la comparación directa con los registros obtenidos por la estación meteorológica durante el periodo de medición. En la Figura 18 se puede apreciar la variación de la temperatura a lo largo de 9 años, entre los cuales alcanzó un valor máximo de 20.74 °C y un valor mínimo de -2.82 °C, promediando un valor de 10.09 °C aproximadamente.

**Figura 18** Variación anual de la temperatura correspondiente al periodo 2010 – 2019.



*Fuente: Elaboración propia.*

En la Tabla 11 se puede visualizar el resultado de las temperaturas promedios máximas y mínimas por meses de cada año.

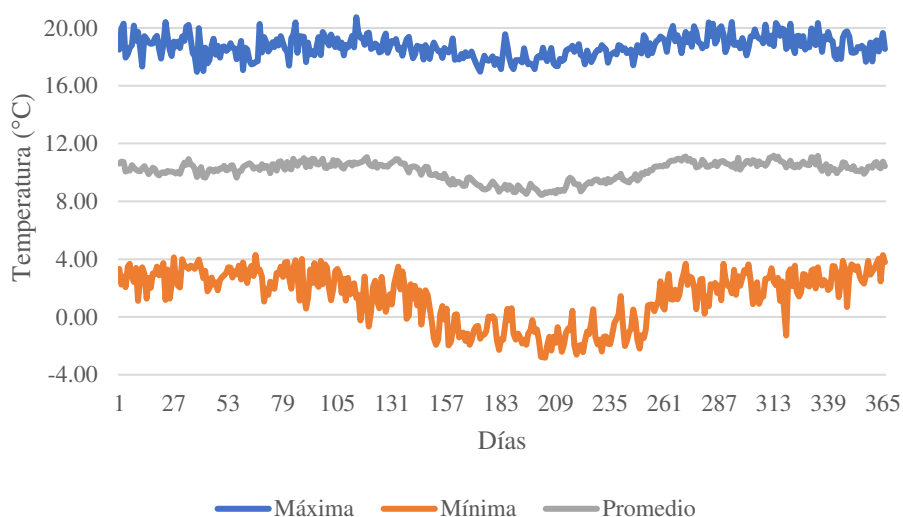
**Tabla 11:**  
*Valores promedios mensuales por año de la temperatura, periodo 2010 – 2019.*

Año	TEMPERATURA																							
	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio		Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
2010	19.42	2.27	20.20	3.36	20.74	-2.62	20.74	2.66	19.62	0.30	18.06	-1.27	-2.32	5.45	18.81	-2.62	19.09	0.71	1.56	5.79	18.90	2.98	16.96	2.77
2011	18.93	2.06	18.31	2.23	17.32	1.06	18.17	1.16	18.36	-1.92	18.03	-1.55	-1.79	5.00	18.65	-1.20	19.19	-0.30	1.16	5.85	20.24	1.97	19.71	1.86
2012	19.72	1.11	17.45	1.84	18.76	3.08	18.66	0.67	18.89	-0.29	17.84	-2.29	-2.80	5.13	18.47	-2.19	19.13	-0.85	0.23	5.39	19.97	2.50	18.85	3.01
2013	19.45	1.26	18.64	1.78	18.66	3.68	19.33	-0.67	19.03	0.76	17.57	-1.00	-1.88	5.27	17.82	-0.40	19.49	-1.59	1.52	5.32	20.29	1.19	19.66	2.93
2014	17.42	1.80	18.66	3.48	19.39	0.58	19.00	2.35	18.98	-0.53	19.28	-1.16	-0.98	5.18	18.28	-1.89	18.85	-0.12	1.67	5.54	20.34	1.73	18.76	2.31
2015	18.98	1.27	18.13	2.89	18.77	1.13	18.11	1.32	18.85	0.79	18.32	-1.56	-1.77	5.60	18.87	-1.09	19.73	0.51	2.18	5.72	20.34	1.35	19.77	2.89
2016	20.40	1.17	19.26	3.76	20.39	3.10	19.73	0.60	19.38	0.61	17.74	-1.92	-2.72	5.79	18.74	-0.28	19.57	0.42	0.88	6.14	19.28	-1.29	19.09	2.62
2017	18.29	2.04	18.07	2.92	17.35	2.97	19.28	2.81	18.50	1.43	18.37	-0.95	-2.82	5.76	18.64	-1.47	20.15	1.45	1.06	5.74	19.45	3.21	19.06	2.47
2018	18.72	2.78	17.30	2.78	18.56	1.41	18.83	1.13	18.82	1.29	17.62	-1.62	-1.57	5.16	17.43	-0.34	18.80	-2.19	0.73	5.10	19.88	2.35	19.42	0.68
2019	20.29	3.01	18.76	3.85	18.78	3.74	19.36	2.08	18.98	0.08	18.40	-1.96	-1.84	5.51	18.82	-2.44	19.19	0.23	1.49	6.02	19.96	3.30	18.97	3.92

Fuente: POWER Data Access, NASA.

En la Figura 19 se calculó un año promedio con los valores obtenidos, para reflejar la variación de la temperatura obtenida de la plataforma de la NASA. Se obtuvo una temperatura promedio de 10.10 °C. Alcanzando un valor promedio máximo de 20.74 °C, registrada el 23 de abril; mientras que el valor promedio más bajo fue de -0.67 °C el 29 de abril, correspondiente a la temporada de clima cálido. Así mismo, en el periodo de clima frío la temperatura alcanzó un valor máximo de 20.15 °C, registrada el 21 de septiembre y el valor más bajo fue de -2.82 °C el 22 de julio.

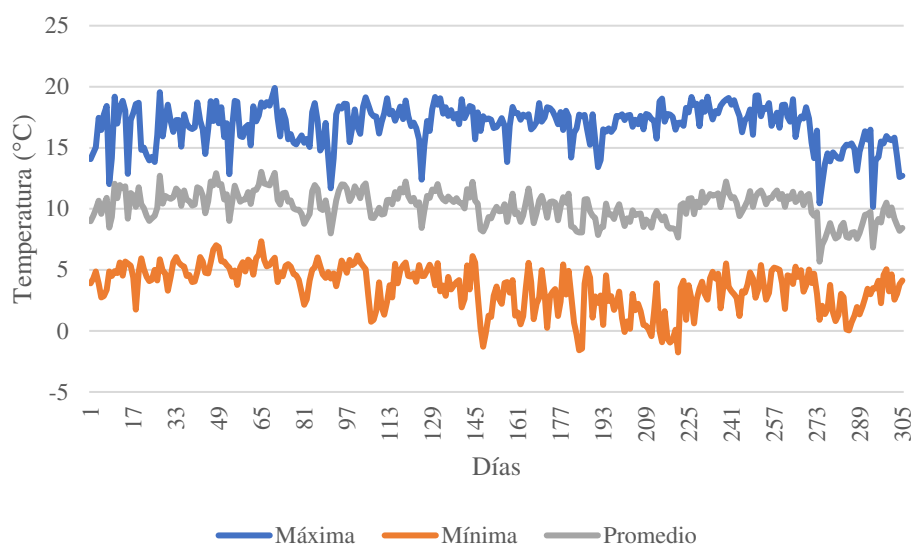
**Figura 19** Variación promedio diario de la temperatura en un año promedio entre 2010 – 2019.



*Fuente: Elaboración propia.*

Para el periodo de medición (enero - octubre) se obtuvo una temperatura promedio de 10.41 °C. En la Figura 20 se puede apreciar la variación de la temperatura en los primeros meses hasta abril, correspondiente a un clima cálido en San Mateo. Se alcanzó un valor máximo de 19.18 °C, registrada el 9 de marzo; mientras que el valor más bajo fue de 0.74 °C el 14 de abril. Por otro lado, se registró que en los meses de clima frío (junio - septiembre) la temperatura alcanzó un valor máximo de 18.66 °C, registrada el 17 de junio y el valor más bajo fue de -1.57 °C el 2 de julio.

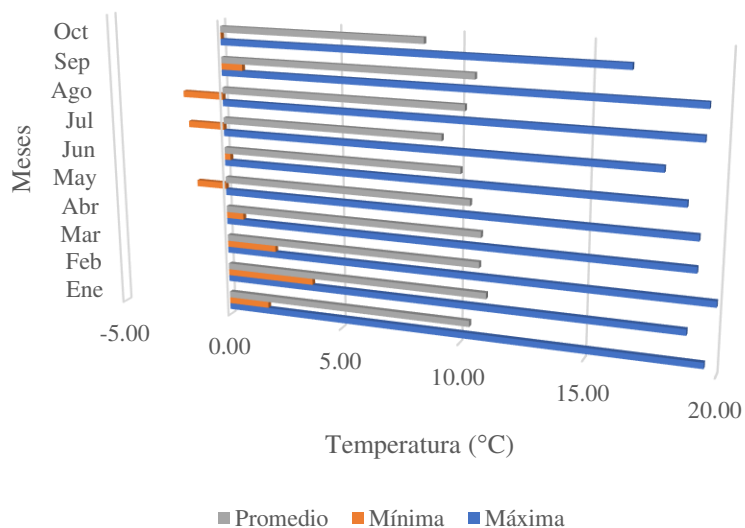
**Figura 20** Variación promedio diaria de la temperatura en el periodo de medición (2020).



*Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 21 efectivamente se puede visualizar las temporadas de clima cálido y frío en San Mateo, siendo el mes de mayo como un periodo de transición de una temporada a otra.

**Figura 21** Variación promedio mensual de la temperatura en el periodo de medición (2020).



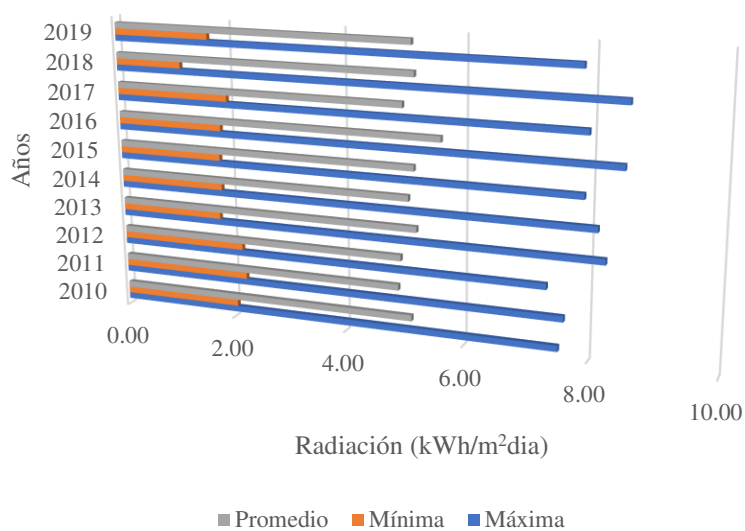
*Fuente: Elaboración propia.*

La temperatura durante el periodo de medición tuvo una variación de  $-1.57^{\circ}\text{C}$  a  $19.18^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, promediando a lo largo de los meses de registro una temperatura de  $10.5^{\circ}\text{C}$  aproximadamente.

#### 4.1.2.2. Registro de medición de radiación.

De la misma manera que con la temperatura, el periodo de datos descargados de la radiación, para su evaluación fue desde el 2010 hasta el 2019, dejando el 2020 para la comparación directa con los registros obtenidos por la estación meteorológica durante el periodo de medición. En la Figura 22 se puede apreciar la variación de la radiación a lo largo de 9 años, entre los cuales alcanzó un valor máximo de 8.54 kWh/m<sup>2</sup> día y un valor mínimo de 1.16 kWh/m<sup>2</sup> día, promediando un valor de 5.15 kWh/m<sup>2</sup> día aproximadamente.

**Figura 22** Variación promedio anual de la radiación incidente correspondiente al periodo 2010 – 2019.



*Fuente: Elaboración propia.*

En la Tabla 12 se puede visualizar el resultado de la radiación promedio máximas y mínimas por meses de cada año.

**Tabla 12:**

*Valores promedios mensuales por año de la radiación incidente, periodo 2010 – 2019.*

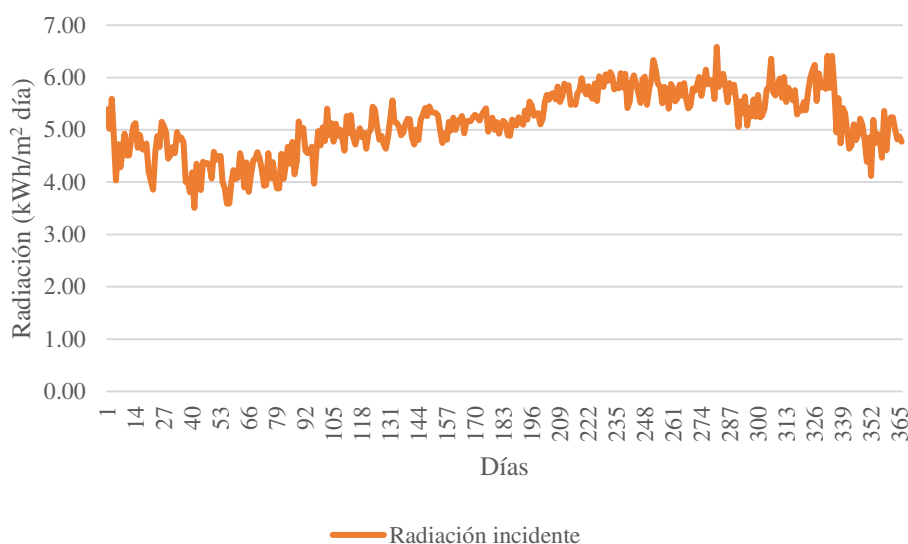
Año	RADIACION																							
	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio		Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
2010	6.60	2.06	6.95	2.71	7.61	2.18	6.22	2.60	5.96	3.88	5.50	3.30	5.81	4.74	6.51	3.84	7.13	3.42	7.07	2.62	7.53	3.11	6.12	2.65
2011	5.92	2.45	5.98	2.57	6.70	2.74	6.40	2.55	5.92	3.23	5.53	3.86	5.98	3.08	6.26	4.45	7.12	2.91	7.61	3.64	7.45	2.90	6.93	2.24
2012	7.21	2.18	6.62	2.43	5.95	2.70	6.24	2.40	5.82	3.49	5.49	3.58	5.87	3.63	6.73	3.23	6.86	4.58	6.87	3.09	7.33	3.55	6.39	2.55
2013	8.24	1.79	6.39	1.99	6.71	2.18	6.94	3.49	6.21	2.24	5.87	2.96	6.45	3.84	6.77	4.13	7.23	4.24	7.26	3.14	7.99	2.62	7.97	2.86
2014	7.16	1.93	6.20	1.84	7.45	2.31	6.77	3.33	6.28	3.41	6.07	4.33	6.12	3.93	6.86	4.06	6.95	3.63	7.71	3.36	8.11	2.92	7.73	2.87
2015	7.89	2.48	6.15	2.33	6.23	1.82	5.84	2.58	6.04	3.08	6.07	3.13	6.37	3.36	7.08	4.24	7.59	3.89	7.54	2.48	7.80	3.15	7.53	3.52
2016	8.12	2.73	6.08	1.85	6.08	2.51	6.92	3.37	6.33	2.48	6.11	2.88	6.50	4.00	6.90	2.99	7.14	4.20	7.98	3.77	8.49	5.75	7.98	2.44
2017	4.99	2.28	6.52	1.98	5.87	2.21	6.34	3.55	6.10	2.52	5.97	3.70	6.39	4.73	6.75	5.01	7.28	2.60	7.88	2.99	7.66	3.49	7.94	2.38
2018	7.66	2.54	7.11	2.03	6.89	2.74	6.90	2.87	6.44	3.37	5.99	2.59	6.28	1.16	6.31	3.67	7.17	4.83	7.55	1.80	8.35	3.32	8.54	3.72
2019	7.55	2.63	5.72	1.67	6.31	3.18	7.25	3.07	6.26	3.78	6.04	3.72	6.25	4.27	6.75	4.77	7.03	1.94	7.84	3.04	7.11	2.59	7.29	2.79

Fuente: Data Access NASA.



En la Figura 23 se calculó un año promedio con los valores obtenidos, para reflejar la variación de la radiación obtenida de la plataforma de la NASA. Se obtuvo una radiación promedio de 5.13 kWh/m<sup>2</sup> día. Alcanzando un valor máximo de 6.59 kWh/m<sup>2</sup> día, registrada el 7 de octubre; mientras que el valor más bajo fue de 3.51 kWh/m<sup>2</sup> día el 10 de febrero.

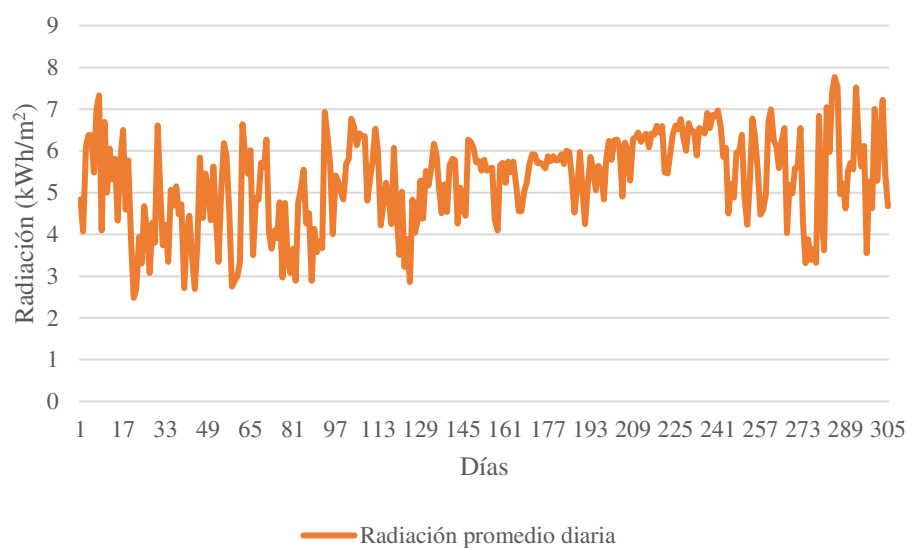
**Figura 23** Variación promedio diario de la radiación incidente en un año promedio entre 2010 – 2019.



*Fuente: Elaboración propia.*

Para el periodo de medición (enero - octubre) se obtuvo una radiación promedio de 5.29 kWh/m<sup>2</sup> día. En la Figura 24 se puede apreciar la variación de la radiación alcanzando un valor máximo de 7.33 kWh/m<sup>2</sup> día, registrada el 8 de enero; mientras que el valor más bajo fue de 2.48 kWh/m<sup>2</sup> día el 21 de enero.

**Figura 24** Variación promedio diaria de la radiación en el periodo de medición (2020).

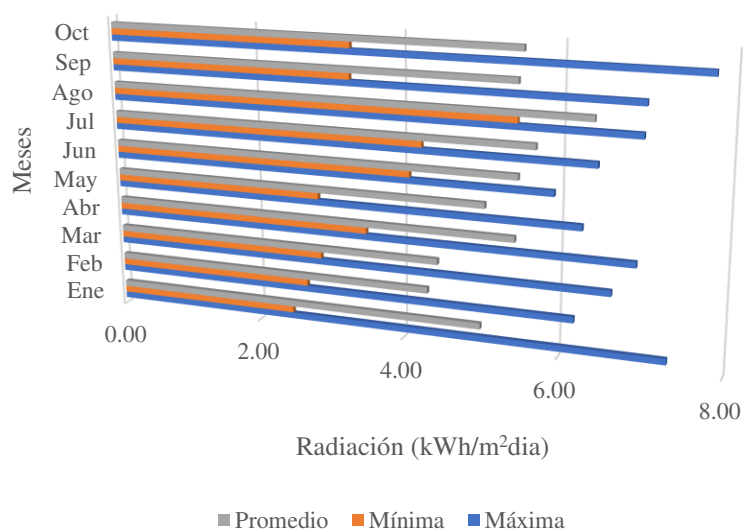


*Fuente: Elaboración propia.*

Los meses de mayor incidencia de radiación se da desde septiembre hasta enero; mientras que la de menor nivel de radiación se presentan desde febrero hasta mayo aproximadamente.

La Figura 25 indica dicha variación en los periodos donde la radiación es alta, media y baja.

**Figura 25** Variación promedio mensual de la radiación incidente en el periodo de medición (2020).



*Fuente: Elaboración propia.*

## Capítulo 5: Discusión e Interpretación

### 5.1. Validación de Datos

Con la finalidad de visualizar el margen de error entre las mediciones, tanto del registro de la EMA como de la base de datos de la NASA durante el periodo de muestreo (ver Tabla 13), para su aplicación en los puntos secundarios de medición, se correlacionaron los valores obtenidos. Este proceso de validación de datos proporcionó la fiabilidad del desarrollo de la metodología presentada en esta investigación. NASA, The POWER Project (2003) recomienda siempre correlacionar los registros en tierra mediante estaciones meteorológicas automáticas con lo obtenido desde su plataforma.

**Tabla 13:**

*Comparación de valores registrados de EMA y NASA, durante el periodo de medición (2020).*

Periodo de medición 2020													
NASA							Estación Meteorológica Automática						
Meses	Temperatura			Radiación			Meses	Temperatura			Radiación		
	Max	Min	Prom	Max	Min	Prom		Max	Min	Prom	Max	Min	Prom
Ene	19.55	1.75	10.42	7.33	2.48	5.01	Ene	16.02	-1.77	7.13	11.25	0.07	5.66
Feb	18.85	3.76	11.09	6.19	2.69	4.32	Feb	15.91	-1.31	7.30	8.60	0.07	4.33
Mar	19.90	2.14	10.80	6.64	2.89	4.45	Mar	16.40	-1.90	7.25	8.70	0.04	4.37
Abr	19.13	0.74	10.87	6.93	3.51	5.44	Abr	16.20	-1.90	7.15	9.69	0.03	4.86
May	19.15	-1.30	10.41	6.27	2.86	5.06	May	15.95	-2.60	6.68	10.69	0.06	5.38
Jun	18.66	0.25	10.02	5.92	4.09	5.47	Jun	15.53	-3.45	6.04	10.93	0.07	5.50
Jul	17.78	-1.57	9.26	6.44	4.25	5.69	Jul	14.75	-3.74	5.51	10.73	0.07	5.40
Ago	19.19	-1.76	10.18	6.97	5.46	6.39	Ago	15.20	-2.96	6.12	10.98	0.07	5.53
Sep	19.28	0.91	10.57	6.99	3.31	5.47	Sep	15.10	-2.69	6.21	11.36	0.07	5.71
Oct	19.48	0.03	8.55	7.77	3.32	5.53	Oct	16.10	-2.62	6.74	12.37	0.06	6.21

Fuente: Data Access NASA & Estación meteorológica del proyecto.

#### 5.1.1. Correlación de temperaturas.

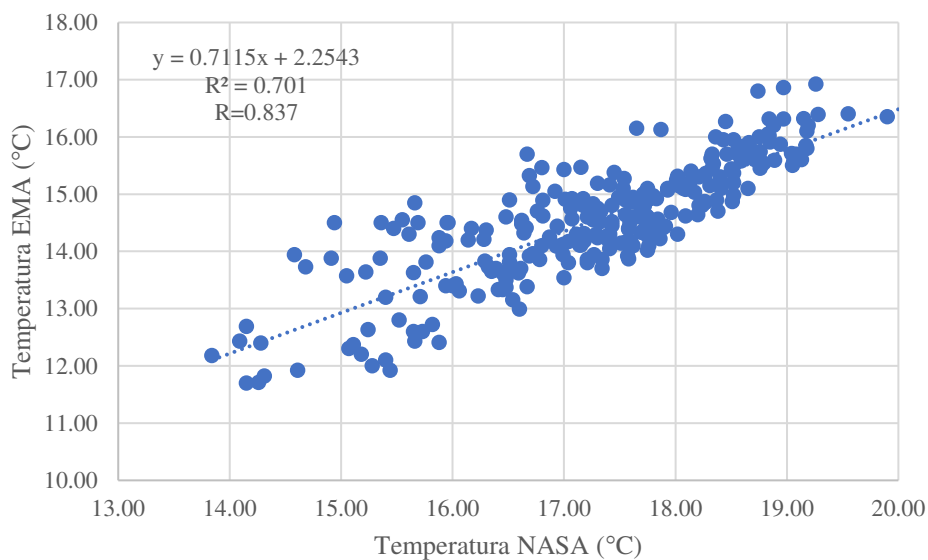
Existe cierta diferencia entre las mediciones extraídas por satélite y las medidas en campo por la EMA debido a la resolución de los datos adquiridos por satélite. Según NASA, The POWER Project, (2003), los datos con los que se correlaciona la información tomada por satélite son con las mismas estaciones en tierra. Sin embargo, la gran mayoría con las que

correlaciona dicha información se encuentran en el hemisferio norte. Es por ello, que es necesario verificar la información extraída de la aplicación POWER correlacionándola con los datos de la EMA utilizada. Una correlación positiva de estas variables nos indicará cuan relacionadas se encuentran para validar su aplicación posteriormente.

#### 5.1.1.1. Temperaturas mensuales máximas.

En la Figura 26 se correlaciona los valores registrados de las temperaturas máximas alcanzadas en el área de estudio. La dispersión de los promedios diarios de las temperaturas máximas arroja un coeficiente de correlación de 0.84, lo que indica una correlación positiva. Este índice denota una relación directa donde ambas variables varían de manera sistemática una respecto a valores similares de la otra. Adicionalmente el RMSE que indica el grado de sesgo de las predicciones con los valores medios resultó 2.81, lo cual es aceptable ya que cuanto más pequeño sea este error la predicción es mejor y un MBE de 2.73 que indica sobreestimación al ser positivo, pero adecuado al ser mínimo.

**Figura 26** Validación de las temperaturas máximas registradas durante el periodo de medición.

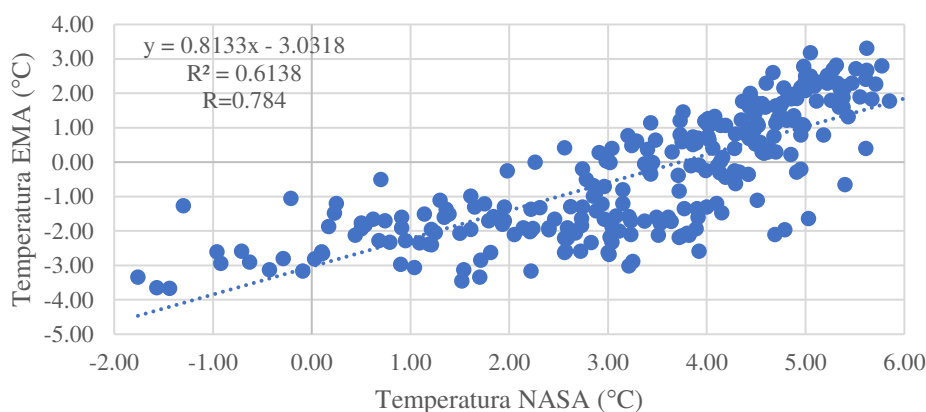


*Fuente: Elaboración propia.*

### 5.1.1.2. Temperaturas mensuales mínimas.

La Figura 27 nos indica la correlación de los valores registrados de las temperaturas mínimas alcanzadas en el área de estudio. La dispersión de los promedios mensuales de las temperaturas mínimas arroja un coeficiente de correlación de 0.78, indicando una correlación positiva. Este índice denota una relación directa donde ambas variables varían de manera sistemática una respecto a valores similares de la otra.

**Figura 27** Validación de las temperaturas mínimas registradas durante el periodo de medición.



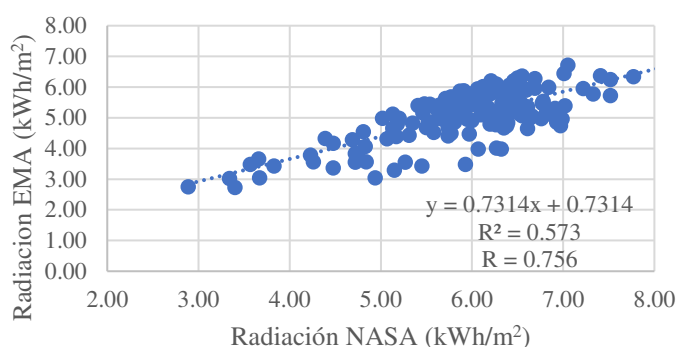
Fuente: Elaboración propia.

Además, el RMSE que indica el grado de sesgo de las predicciones con los valores medios resultó 3.82, lo cual es aceptable ya que cuanto más pequeño sea este error la predicción es mejor y un MBE de 3.65 que indica sobreestimación al ser positivo, pero adecuado al ser mínimo.

### 5.1.2. Correlación de la radiación.

De la misma manera como con los datos de temperatura, se aprecia en la Figura 28 la correlación de los valores registrados de la radiación obtenida en el área de estudio durante el periodo de medición por la EMA en tierra y la aplicación POWER. La dispersión de los promedios diarios de la radiación arroja un coeficiente de correlación de 0.76, lo cual indica una correlación positiva. Este índice denota una relación directa donde ambas variables varían de manera sistemática una respecto a valores similares de la otra.

**Figura 28** Validación de la radiación promedio diaria registrada durante el periodo de medición.



*Fuente: Elaboración propia.*

Además, el RMSE que indica el grado de sesgo de las predicciones con los valores medios resultó 1.04, lo cual es aceptable ya que cuanto más pequeño sea este error la predicción es mejor y un MBE de 0.85 que indica subestimación al ser negativo, pero adecuado al ser mínimo.

## 5.2. Aplicación de los Modelos de Estimación como Alternativas de Cálculo

Dada la validación de los datos registrados se procede a realizar el cálculo de la radiación solar incidente mediante las tres alternativas de modelos de estimación presentadas, que utilizan como parámetros de entrada la amplitud térmica, de modo que se obtenga una metodología de aplicación para la determinación del potencial solar con la alternativa que muestre mejores resultados para las condiciones dadas en el área de estudio.

Es necesario calibrar cada modelo utilizado al lugar de aplicación y controlarlos a partir de las mediciones hechas en tierra (Baigorria et al., 2004).

Para el desarrollo de cada modelo de estimación se utilizó la hoja de cálculo de Excel, introduciendo los parámetros de entrada físicos y geométricos (ubicación).

### **5.2.1. Alternativa 1: Modelo Bristow-Campbell.**

El modelo BC utiliza variables de entrada, limitadas por sus valores máximos y mínimos, en una expresión exponencial típica de fenómenos físicos que representan los posibles valores en los límites de su variación (Torrez, Burgoa, & Ricaldi, 2013).

En la Tabla 14 se muestra las variables utilizadas en el desarrollo del proceso del cálculo para el modelo BC en Excel.

**Tabla 14:**  
*Desarrollo del Modelo de estimación Bristow-Campbell en Excel*

Fecha	Temperatura		Rad. Med.	Dia Juliano	Latitud $\phi$	F. de Corrección $E_0$	Declinación $\delta$	Angulo horario $\omega$	Rad. Extraterrestre		Cte. A	Cte. C	Cte. B	Radiación Global	
	Max	Min	kWh/m <sup>2</sup>						MJ/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>				MJ/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>
01/01/2020	14.18	0.56	4.84	1	-11.855	1.033	-23.012	95.115	34.934	9.704	0.645	1.136	0.076	17.610	4.892
02/01/2020	13.94	0.82	4.07	2	-11.855	1.033	-22.931	95.095	34.955	9.710	0.550	1.172	0.070	17.370	4.825
03/01/2020	13.57	-0.97	6.11	3	-11.855	1.033	-22.843	95.073	34.978	9.716	0.794	1.070	0.090	18.056	5.016
04/01/2020	14.38	-1.74	6.38	4	-11.855	1.033	-22.748	95.050	35.002	9.723	0.799	0.956	0.121	18.735	5.204
05/01/2020	13.6	-1.19	6.38	5	-11.855	1.033	-22.647	95.024	35.027	9.730	0.823	1.052	0.094	18.191	5.053
06/01/2020	12.79	-1.68	5.48	6	-11.855	1.033	-22.538	94.998	35.054	9.737	0.712	1.075	0.088	18.064	5.018
07/01/2020	13.18	-0.04	7.02	7	-11.855	1.033	-22.424	94.969	35.082	9.745	0.943	1.165	0.071	17.484	4.857
08/01/2020	13.4	1.35	7.33	8	-11.855	1.033	-22.302	94.939	35.111	9.753	1.022	1.249	0.059	16.839	4.677
09/01/2020	14.35	-0.13	4.09	9	-11.855	1.033	-22.174	94.908	35.141	9.761	0.530	1.074	0.089	18.114	5.032
10/01/2020	13.8	-0.86	6.69	10	-11.855	1.033	-22.040	94.875	35.173	9.770	0.862	1.061	0.091	18.210	5.058
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
22/10/2020	14.86	-0.1	6.12	296	-11.855	1.0123	-12.446	92.655	36.380	10.106	0.757	1.039	0.097	19.610	5.447
23/10/2020	12.8	0	3.55	297	-11.855	1.0129	-12.786	92.730	36.350	10.097	0.466	1.195	0.067	18.489	5.136
24/10/2020	13.88	0.26	5.27	298	-11.855	1.0134	-13.122	92.805	36.319	10.089	0.676	1.136	0.076	18.925	5.257
25/10/2020	14.5	-0.5	4.63	299	-11.855	1.014	-13.455	92.879	36.286	10.080	0.574	1.036	0.097	19.577	5.438
26/10/2020	14.5	-2.1	7.01	300	-11.855	1.014	-13.784	92.952	36.253	10.070	0.839	0.921	0.133	20.272	5.631
27/10/2020	14.3	0.3	5.28	301	-11.855	1.015	-14.108	93.024	36.220	10.061	0.672	1.108	0.081	19.067	5.296
28/10/2020	12.72	0.42	6.25	302	-11.855	1.015	-14.428	93.096	36.185	10.051	0.838	1.231	0.062	18.101	5.028
29/10/2020	11.82	0.4	7.22	303	-11.855	1.016	-14.744	93.167	36.150	10.042	1.002	1.294	0.054	17.480	4.856
30/10/2020	10.94	-2.12	5.46	304	-11.855	1.016	-15.056	93.237	36.114	10.032	0.716	1.176	0.070	18.517	5.144
31/10/2020	14.08	-2.04	4.68	305	-11.855	1.017	-15.363	93.306	36.077	10.022	0.569	0.956	0.121	19.962	5.545

Fuente: Elaboración propia.



Para hallar los coeficientes del modelo BC se procedió a transformar la ecuación en forma de función lineal en términos de los parámetros que afectan a la variación de la temperatura. Esto se realizó debido a que no se cuenta con un parámetro de transmitancia máxima (A) en el área de estudio. Por consiguiente, combinando procedimientos de mínimos cuadrados e iteración se llega a obtener los valores de la constante. Para el área de estudio se obtuvo un coeficiente de transmitancia de 0.6741. En la tabla 16 se indica los valores obtenidos posterior al cálculo con las constantes del modelo BC determinadas.

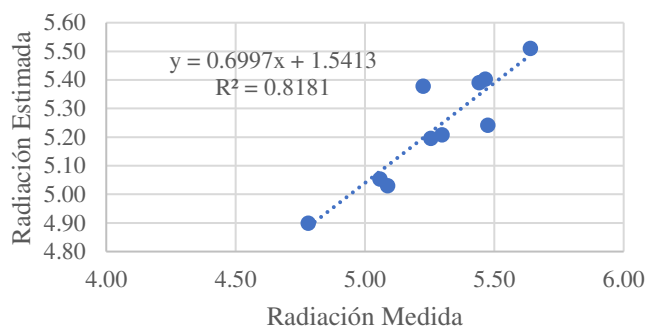
**Tabla 15:**  
*Resultados promedio mensual de la aplicación del modelo Bristow-Campbell.*

Mes	Temperatura		Radiación	
	Max	Min	Medida EMA	Estimada BC
Enero	16.02	-1.77	5.01	5.20
Febrero	15.91	-1.31	4.32	5.21
Marzo	16.40	-1.90	4.45	5.51
Abril	16.20	-1.90	5.44	5.39
Mayo	15.95	-2.60	5.06	5.05
Junio	15.53	-3.45	5.47	4.90
Julio	14.75	-3.74	5.69	5.03
Agosto	15.20	-2.96	6.39	5.24
Septiembre	15.10	-2.69	5.47	5.40
Octubre	16.10	-2.62	5.53	5.38

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 29 indica la dispersión entre la radiación medida y la radiación calculada que nos permite no solo calcular la constante de transmitancia atmosférica para el área de estudio, sino que también nos confiere determinar el nivel de correlación que existe entre esas variables y la calidad del modelo para utilizarlo en los resultados.

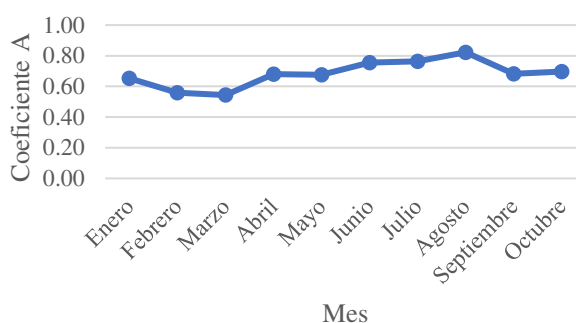
**Figura 29** Correlación entre la radiación mensual registrada y estimada según el modelo BC.



Fuente: Elaboración propia.

La representación de la variación diaria de la constante de transmitancia atmosférica se representa en la Figura 30. Lo que nos indica una interpretación del estado dinámico de la atmósfera para cada día dentro del periodo de registro.

**Figura 30** Variación promedio mensual de la transmitancia atmosférica máxima según modelo BC.



Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.1.1. Validación de Modelo Bristow-Campbell.

La Tabla 16 nos muestra el análisis estadístico del modelo de estimación BC para el periodo de registro bajo las condiciones del área de estudio.

**Tabla 16:**

*Indicadores estadísticos para la aplicación del Modelo Bristow-Campbell.*

R	R <sup>2</sup>	RMSE	MBE	MABE	MPE	MAPE	% Error
0.904	0.818	1.14	0.06	0.06	-4.30	4.30	1.07

Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de correlación resultó 0.904, que significa un grado de aceptabilidad muy buena considerando que la serie temporal evaluada es reducida a comparación de estudios con data histórica de años. Además, se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.818, dando validez a la calidad de aplicación del modelo. Por otro lado, el RMSE que indica el grado de sesgo de las predicciones con los valores medios resultó 1.14, lo cual es excelente, ya que cuanto más pequeño sea este error la predicción es mejor; un MBE de 0.06 que indica sobreestimación al ser positivo, pero adecuado al ser mínimo; MABE de 0.06 que a diferencia del error MBE, este indicador tiene en cuenta el valor absoluto por lo que siempre resultará positivo; MPE de -4.30, un valor negativo que indica subestimación de los valores estimados, pero muy bajo; y un MAPE de 4.30 que indica que tanto se desvió el valor estimado en promedio del valor medio. Por último, se obtuvo un porcentaje de error de 1.07% que nos indica un margen mínimo de las diferencias existentes entre la radiación estimada con la medida, que es admisible cuando se encuentra en el rango de -10% a 10%.

De acuerdo a los resultados obtenidos y la excelente adaptación del modelo Bristow-Campbell, confirma el trabajo realizado por Camayo Lapa et al. (2015), que los valores estimados de radiación solar global produjeron similitud a los valores observados de radiación solar global; a lo que Baigorria et al. (2004), concluía que el modelo se adapta muy bien a las condiciones del Perú.

### **5.2.2. Alternativa 2: Modelo Hargreaves-Samani.**

De la misma manera el modelo HS utiliza variables de entrada limitadas por valores máximos y mínimos en una expresión que es función de la raíz cuadrada de la amplitud térmica, que representan los posibles valores en los límites de su variación. La constante de proporcionalidad se interpreta como la transmitancia atmosférica. Hargreaves (1994), recomendó utilizar valores para la transmitancia atmosférica de 0.162 para zonas interiores y 0.19 para zonas costeras.

En la Tabla 17 se muestra las variables utilizadas en el desarrollo del proceso del cálculo para el modelo HS en Excel.

**Tabla 17:***Desarrollo del Modelo de estimación Hargreaves-Samani en Excel*

Fecha	Temperatura		Rad. Med.	Dia Juliano	Latitud $\phi$	F. de Corrección	Declinación $\delta$	Angulo horario $\omega$	Rad. Extraterrestre		Cte. A	Radiación Global	
	Max	Min	kWh/m <sup>2</sup>			E <sub>0</sub>			MJ/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>		MJ/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>
01/01/2020	14.18	0.56	4.84	1	-11.855	1.033	-23.012	95.115	34.934	9.704	0.1351	19.313	5.365
02/01/2020	13.94	0.82	4.07	2	-11.855	1.033	-22.931	95.095	34.955	9.710	0.1157	18.967	5.268
03/01/2020	13.57	-0.97	6.11	3	-11.855	1.033	-22.843	95.073	34.978	9.716	0.1649	19.98	5.550
04/01/2020	14.38	-1.74	6.38	4	-11.855	1.033	-22.748	95.050	35.002	9.723	0.1634	21.052	5.848
05/01/2020	13.6	-1.19	6.38	5	-11.855	1.033	-22.647	95.024	35.027	9.730	0.1705	20.179	5.605
06/01/2020	12.79	-1.68	5.48	6	-11.855	1.033	-22.538	94.998	35.054	9.737	0.148	19.975	5.549
07/01/2020	13.18	-0.04	7.02	7	-11.855	1.033	-22.424	94.969	35.082	9.745	0.1981	19.108	5.308
08/01/2020	13.4	1.35	7.33	8	-11.855	1.033	-22.302	94.939	35.111	9.753	0.2165	18.258	5.072
09/01/2020	14.35	-0.13	4.09	9	-11.855	1.033	-22.174	94.908	35.141	9.761	0.1101	20.031	5.564
10/01/2020	13.8	-0.86	6.69	10	-11.855	1.033	-22.040	94.875	35.173	9.770	0.1788	20.174	5.604
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
22/10/2020	14.86	-0.10	6.12	296	-11.855	1.0123	-12.446	92.655	36.380	10.106	0.157	21.782	6.051
23/10/2020	12.80	0.00	3.55	297	-11.855	1.0129	-12.786	92.730	36.350	10.097	0.098	20.132	5.592
24/10/2020	13.88	0.26	5.27	298	-11.855	1.0134	-13.122	92.805	36.319	10.089	0.142	20.749	5.764
25/10/2020	14.50	-0.50	4.63	299	-11.855	1.0139	-13.455	92.879	36.286	10.080	0.119	21.755	6.043
26/10/2020	14.50	-2.10	7.01	300	-11.855	1.0144	-13.784	92.952	36.253	10.070	0.171	22.865	6.351
27/10/2020	14.30	0.30	5.28	301	-11.855	1.0149	-14.108	93.024	36.220	10.061	0.140	20.979	5.827
28/10/2020	12.72	0.42	6.25	302	-11.855	1.0154	-14.428	93.096	36.185	10.051	0.177	19.645	5.457
29/10/2020	11.82	0.40	7.22	303	-11.855	1.0159	-14.744	93.167	36.150	10.042	0.213	18.911	5.253
30/10/2020	10.94	-2.12	5.46	304	-11.855	1.0164	-15.056	93.237	36.114	10.032	0.151	20.203	5.612
31/10/2020	14.08	-2.04	4.68	305	-11.855	1.0169	-15.363	93.306	36.077	10.022	0.116	22.423	6.229

Fuente: Elaboración propia.

Para calcular la constante de proporcionalidad del modelo HS se procedió a transformar la ecuación en forma de función lineal en términos de los parámetros que afectan a la variación de la temperatura. Esto se realizó debido a que no se cuenta con un parámetro de transmitancia máxima  $A$  en el área de estudio. Por consiguiente, combinando procedimientos de mínimos cuadrados e iteración se llega a obtener el valor de la constante. Para el área de estudio se obtuvo un valor de 0.1548 para el coeficiente de transmitancia atmosférica, este valor difiere relativamente con respecto a lo recomendado. En la tabla 18 se indica los valores obtenidos posterior al cálculo con la constante determinada del modelo HS.

**Tabla 18:**

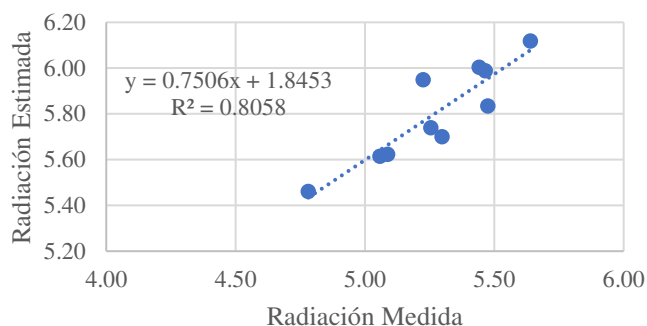
*Resultados promedio mensual de la aplicación del modelo Hargreaves-Samani.*

Mes	Temperatura			Radiación	
	Max	Min	Prom	Medida EMA	Estimada HS
Enero	16.02	-1.77	7.13	5.01	5.55
Febrero	15.91	-1.31	7.30	4.93	5.52
Marzo	16.40	-1.90	7.25	5.25	5.92
Abril	16.20	-1.90	7.15	5.26	5.81
Mayo	15.95	-2.60	6.68	4.85	5.43
Junio	15.53	-3.45	6.04	4.78	5.28
Julio	14.75	-3.74	5.51	4.94	5.44
Agosto	15.20	-2.96	6.12	6.39	5.83
Septiembre	15.10	-2.69	6.21	5.47	5.99
Octubre	16.10	-2.62	6.74	5.53	5.95

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 31 indica la dispersión entre la radiación medida y la radiación calculada que nos permite no solo calcular la constante de transmitancia atmosférica para el área de estudio, sino que también nos confiere determinar el grado de correlación existente entre esas dos variables.

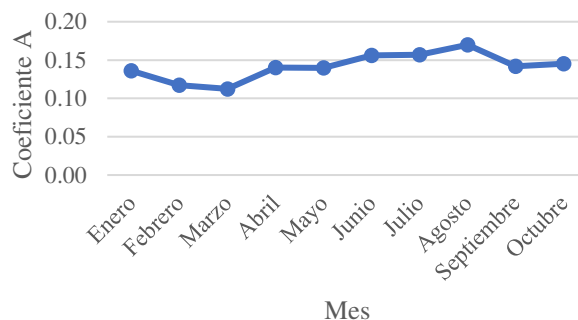
**Figura 31** Correlación entre la radiación mensual registrada y estimada según el modelos HS.



Fuente: Elaboración propia.

La representación de la variación diaria de la constante de transmitancia atmosférica máxima se representa en la Figura 32. Lo que nos indica una interpretación del estado dinámico de la atmósfera para cada día dentro del periodo de registro.

**Figura 32** Variación promedio mensual de la transmitancia atmosférica máxima según modelo HS.



Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.2.1. Validación de Modelo Hargreaves-Samani.

La Tabla 19 nos muestra el análisis estadístico del modelo de estimación HS para el periodo de registro bajo las condiciones del área de estudio.

**Tabla 19:**

*Indicadores estadísticos para la aplicación del Modelo Hargreaves-Samani.*

R	R <sup>2</sup>	RMSE	MBE	MABE	MPE	MAPE	% Error
0.960	0.921	1.27	-0.52	0.52	-15.66	15.66	-9.77

Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de correlación resultó 0.960, que significa un grado de aceptabilidad excelente considerando que la serie temporal evaluada es reducida a comparación de estudios con data histórica de años. Además, se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.921, dando validez a la calidad de aplicación del modelo. Por otro lado, el RMSE que indica el grado de sesgo de las predicciones con los valores medios resultó 1.27, lo cual es excelente, ya que cuanto más pequeño sea este error la predicción es mejor; un MBE de -0.52 que indica subestimación al ser negativo, pero adecuado al ser mínimo; MABE de 0.52 que a diferencia del error MBE, este indicador tiene en cuenta el valor absoluto por lo que siempre resultará positivo; MPE de -15.66, un valor negativo que indica subestimación de los valores estimados, pero relativamente bajo; y un MAPE de 15.66 que indica que tanto se desvió el valor estimado en promedio del valor medio. Por último, se obtuvo un porcentaje de error de -9.77% que nos indica un margen significativo entre las diferencias existentes entre la radiación estimada con la medida, que es admisible cuando se encuentra en el rango de -10% a 10%.

Dados los buenos resultados obtenidos con la adaptación del modelo Hargreaves-Samani, se corrobora la afirmación de Gastelo Roque, Morales Acevedo, & Tineo Soto (2017), donde menciona la fácil aplicación y de resultados favorables para la obtención de la radiación solar global. Además, se presentan similitudes al grado de correlación con el estudio de Mudasiru & Mustafa (2019), para la aplicabilidad del modelo.

### **5.2.3. Alternativa 3: Modelo Annandale.**

El modelo ANN utiliza variables de entrada limitadas por valores máximos y mínimos en una expresión que es función de la raíz cuadrada de la amplitud térmica, que representan los posibles valores en los límites de su variación. La constante de proporcionalidad se interpreta como la transmitancia atmosférica. El modelo ANN es considerado un ajuste del modelo HS, en el cual se considera la altura (m.s.n.m.) del lugar de aplicación. En la Tabla 20 se muestra las variables utilizadas en el desarrollo del proceso del cálculo para el modelo ANN en Excel.



**Tabla 20:***Desarrollo del Modelo de estimación Annandale en Excel*

Fecha	Temperatura		Rad. Med.	Dia Juliano	Latitud $\phi$	F. de Corrección $E_0$	Declinación $\delta$	Angulo horario $\omega$	Rad. Extraterrestre		Cte. A	Radiación Global	
	Max	Min	kWh/m <sup>2</sup>						MJ/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>		MJ/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>
01/01/2020	14.18	0.56	4.84	1	-11.855	1.033	-23.012	95.115	34.934	9.704	0.121	19.254	5.348
02/01/2020	13.94	0.82	4.07	2	-11.855	1.033	-22.931	95.095	34.955	9.710	0.103	18.909	5.252
03/01/2020	13.57	-0.97	6.11	3	-11.855	1.033	-22.843	95.073	34.978	9.716	0.147	19.919	5.533
04/01/2020	14.38	-1.74	6.38	4	-11.855	1.033	-22.748	95.050	35.002	9.723	0.146	20.988	5.830
05/01/2020	13.6	-1.19	6.38	5	-11.855	1.033	-22.647	95.024	35.027	9.730	0.152	20.118	5.588
06/01/2020	12.79	-1.68	5.48	6	-11.855	1.033	-22.538	94.998	35.054	9.737	0.132	19.914	5.532
07/01/2020	13.18	-0.04	7.02	7	-11.855	1.033	-22.424	94.969	35.082	9.745	0.177	19.050	5.292
08/01/2020	13.4	1.35	7.33	8	-11.855	1.033	-22.302	94.939	35.111	9.753	0.193	18.202	5.056
09/01/2020	14.35	-0.13	4.09	9	-11.855	1.033	-22.174	94.908	35.141	9.761	0.098	19.970	5.547
10/01/2020	13.8	-0.86	6.69	10	-11.855	1.033	-22.040	94.875	35.173	9.770	0.160	20.112	5.587
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
22/10/2020	14.86	-0.10	6.12	296	-11.855	1.0123	-12.446	92.655	36.380	10.106	0.140	21.803	6.056
23/10/2020	12.80	0.00	3.55	297	-11.855	1.0129	-12.786	92.730	36.350	10.097	0.088	20.151	5.597
24/10/2020	13.88	0.26	5.27	298	-11.855	1.0134	-13.122	92.805	36.319	10.089	0.126	20.768	5.769
25/10/2020	14.50	-0.50	4.63	299	-11.855	1.0139	-13.455	92.879	36.286	10.080	0.106	21.776	6.049
26/10/2020	14.50	-2.10	7.01	300	-11.855	1.0144	-13.784	92.952	36.253	10.070	0.152	22.887	6.357
27/10/2020	14.30	0.30	5.28	301	-11.855	1.0149	-14.108	93.024	36.220	10.061	0.125	20.999	5.833
28/10/2020	12.72	0.42	6.25	302	-11.855	1.0154	-14.428	93.096	36.185	10.051	0.158	19.664	5.462
29/10/2020	11.82	0.40	7.22	303	-11.855	1.0159	-14.744	93.167	36.150	10.042	0.190	18.929	5.258
30/10/2020	10.94	-2.12	5.46	304	-11.855	1.0164	-15.056	93.237	36.114	10.032	0.134	20.222	5.617
31/10/2020	14.08	-2.04	4.68	305	-11.855	1.0169	-15.363	93.306	36.077	10.022	0.104	22.444	6.234

Fuente: Elaboración propia.

Para calcular la constante de proporcionalidad del modelo ANN se procedió a transformar la ecuación en forma de función lineal en términos de los parámetros que afectan a la variación de la temperatura. Esto se realizó debido a que no se cuenta con un parámetro de transmitancia máxima (A) en el área de estudio. Por consiguiente, combinando procedimientos de mínimos cuadrados e iteración se llega a obtener el valor de la constante. El valor resultante para dicha constante de proporcionalidad que a su vez es el valor del coeficiente de transmitancia máxima fue de 0.1383, mostrando diferencia relativa al valor recomendado para zonas interiores, así como el modelo HS. En la tabla 21 se indica los valores obtenidos posterior al cálculo con la constante determinada del modelo ANN.

**Tabla 21:**

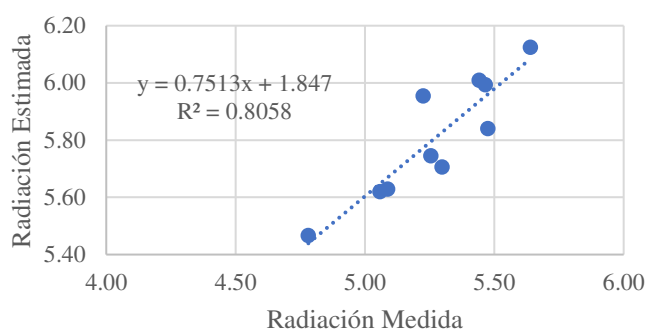
*Resultados promedio mensual de la aplicación del Modelo Annandale.*

Mes	Temperatura			Radiación	
	Max	Min	Prom	Medida EMA	Estimada ANN
Enero	16.02	-1.77	7.13	5.01	5.54
Febrero	15.91	-1.31	7.30	4.93	5.50
Marzo	16.40	-1.90	7.25	5.25	5.90
Abril	16.20	-1.90	7.15	5.26	5.79
Mayo	15.95	-2.60	6.68	4.85	5.42
Junio	15.53	-3.45	6.04	4.78	5.27
Julio	14.75	-3.74	5.51	4.94	5.42
Agosto	15.20	-2.96	6.12	6.39	5.84
Septiembre	15.10	-2.69	6.21	5.47	5.99
Octubre	16.10	-2.62	6.74	5.53	5.95

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 33 indica la dispersión entre la radiación medida y la radiación calculada nos permite no solo calcular la constante de transmitancia atmosférica para el área de estudio, sino que también nos confiere determinar el grado de correlación existente entre esas dos variables.

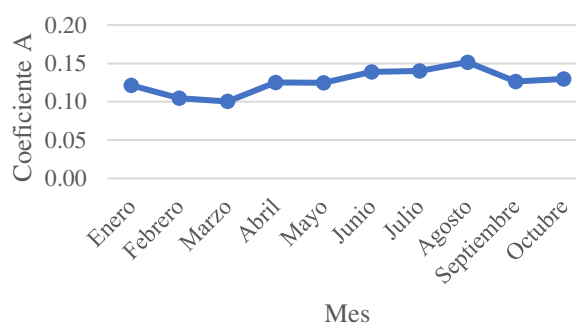
**Figura 33** Correlación entre la radiación mensual registrada y estimada según el modelos ANN.



Fuente: Elaboración propia.

La representación de la variación diaria de la constante de transmitancia atmosférica máxima se representa en la Figura 34. Lo que nos indica una interpretación del estado dinámico de la atmósfera para cada día en el periodo de registro.

**Figura 34** Variación promedio mensual de la transmitancia atmosférica máxima según modelo ANN.



Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.3.1. Validación de Modelo Annandale.

La Tabla 22 nos muestra el análisis estadístico del modelo de estimación ANN para el periodo de registro bajo las condiciones del área de estudio.

**Tabla 22:**

*Indicadores estadísticos para la aplicación del Modelo Annandale.*

R	R <sup>2</sup>	RMSE	MBE	MABE	MPE	MAPE	% Error
0.960	0.921	1.27	-0.52	0.52	-15.77	15.77	-9.87

Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de correlación resultó 0.976, que significa un grado de aceptabilidad excelente considerando que la serie temporal evaluada es reducida a comparación de estudios con data histórica de años. Además, se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.954, dando validez a la calidad de aplicación del modelo. Por otro lado, el RMSE que indica el grado de sesgo de las predicciones con los valores medios resultó 1.27, lo cual es excelente, ya que cuanto más pequeño sea este error la predicción es mejor; un MBE de -0.52 que indica subestimación al ser negativo, pero adecuado al ser mínimo; MABE de 0.52 que a diferencia del error MBE, este indicador tiene en cuenta el valor absoluto por lo que siempre resultará positivo; MPE de -15.77, valor negativo que indica subestimación de los valores estimados, pero considerablemente bajo; y un MAPE de 15.77 que indica que tanto se desvió el valor estimado en promedio del valor medio. Por último, se obtuvo un porcentaje de error de -9.87% que nos indica un margen significativo entre las diferencias existentes entre la radiación estimada con la medida, que es admisible cuando se encuentra en el rango de -10% a 10%.

Con resultados muy similares al de su modelo predecesor, el modelo Annandale también se mostró ajustarse bien a las condiciones de aplicación y obtener una correlación aceptable para la determinación de la radiación solar global. Se confirma dentro del estudio de Adamala & Krishna Reddy (2019), su práctica aplicación y de buena respuesta para obtener la radiación solar global en un área específica.

### **5.3. Selección del Modelo de Estimación Adecuado para el Área de Estudio.**

Finalmente terminamos el análisis de los resultados con una comparación de los valores registrados y los calculados por los modelos BC, HS y ANN. Como se puede notar en la Tabla 23 la diferencia entre los modelos es porcentualmente pequeña, con esto se quiere decir que para fines prácticos y de mayor aprovechamiento de la energía solar, estas diferencias permanecen dentro de un margen de confiabilidad considerando diseños de ingeniería y/o visualización de desarrollo de tecnología. Los valores obtenidos por los indicadores permiten

interpretar el comportamiento aproximado de los modelos evaluados para establecer el mejor performance.

**Tabla 23:**

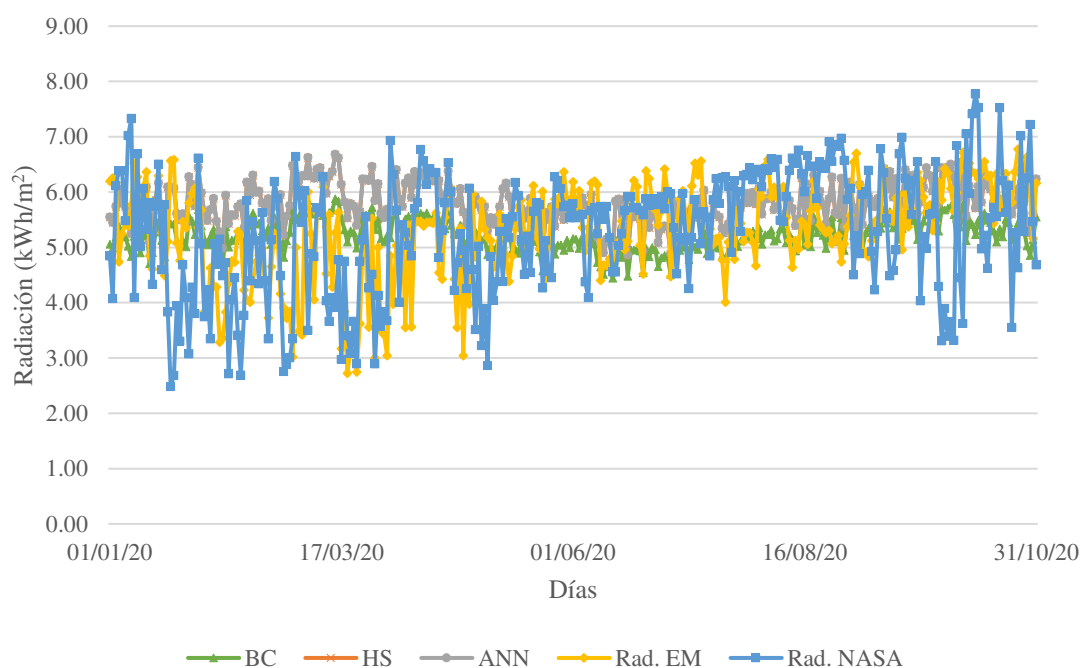
*Análisis comparativo de los modelos de estimación mediante indicadores estadísticos.*

Modelos	Análisis estadístico							
	R	R <sup>2</sup>	RMSE	MBE	MABE	MPE	MAPE	% Error
Bristow-Campbell	0.904	0.818	1.14	0.06	0.06	-4.30	4.30	1.07
Hargreaves-Samani	0.960	0.921	1.27	-0.52	0.52	-15.66	15.66	-9.77
Annandale	0.960	0.921	1.27	-0.52	0.52	-15.77	15.77	-9.87

Fuente: Elaboración propia.

El la Figura 35 se puede observar la similitud que presentan los modelos con respecto a la serie temporal registrada, las diferencias son mínimas, por lo que se puede afirmar que en general se muestra un comportamiento hacia un valor promedio de la radiación solar observado durante todo el periodo de medición.

**Figura 35** Radiación observada versus radiación obtenida por los modelos de estimación.



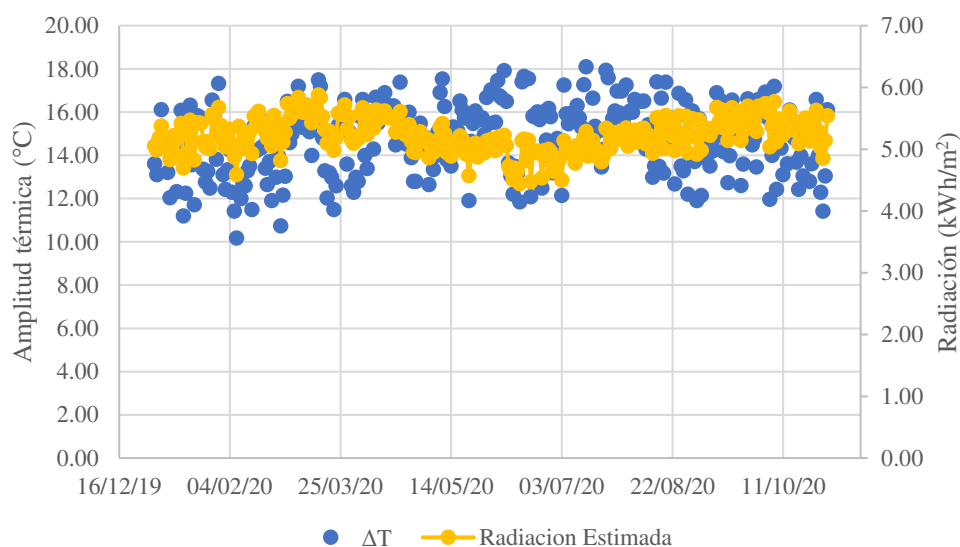
Fuente: Elaboración propia.

Para la selección del modelo más óptimo se consideró todos los resultados mostrados, por consiguiente, para determinar el potencial solar en todo el distrito se seleccionó el que mayor resultado favorable obtuvo, en este caso el modelo de estimación BC fue el que consiguió

valores más aceptables y acordes a las condiciones del área de estudio, para considerar que su aplicación en los puntos auxiliares de medición es acertadamente posible, con errores mínimos y sencillamente superables. Con lo que se corrobora con mayor énfasis lo expuesto por Baigorria et al., (2004) la buena adaptación que tiene este modelo ante la variabilidad climática y topográfica que presenta el Perú.

Con la selección del modelo de estimación de mayor ajuste a las condiciones de la zona de investigación, se puede apreciar en la Figura 36 la relación existente entre la radiación solar incidente con la amplitud térmica y confirmar la utilidad del modelo de estimación destacado.

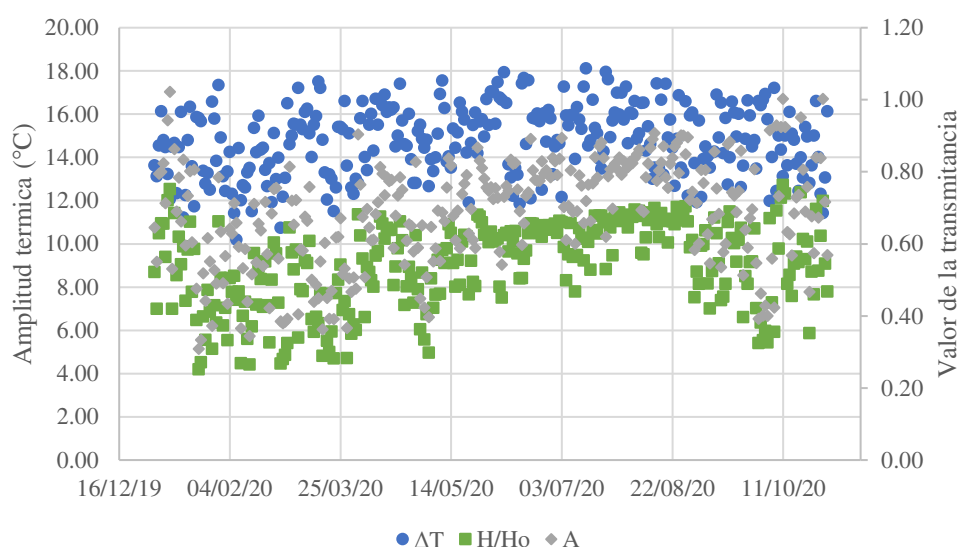
**Figura 36** Relación entre la radiación solar estimada y la amplitud térmica.



*Fuente: Elaboración propia.*

Por otro lado, en la Figura 37 podemos observar el comportamiento asociativo de la amplitud térmica con parámetros de transmitancia atmosférica diaria, también llamado índice de claridad ( $H/H_0$ ) y la transmitancia atmosférica máxima diaria ( $A$ ), la cual nos proporciona información sobre el comportamiento dinámico de la atmósfera para cada día. La diferencia entre ambos valores de transmitancia recae en ajustes dentro de los modelos empíricos para determinar con mayor exactitud o aproximarse al estado de nuestro medio fluido para una ubicación y tiempo determinado.

**Figura 37** Relación entre la amplitud térmica y los valores de transmitancia atmosférica.



*Fuente: Elaboración propia.*

Dentro de los valores que toma la amplitud térmica se denota que a menores que este extremo sea, estos días son los que presentan nubosidad y/o precipitaciones, por lo que la temperatura desciende; de igual forma cuando existe días despejados, es decir, el valor de la transmitancia se acerca a la unidad, la temperatura suele ser alta.

#### 5.4. Aplicación del Modelo de Estimación Seleccionado para los Puntos Auxiliares de Medición

Mediante la información descargada de la base de datos de la NASA para los puntos auxiliares de medición, se procedió a realizar el cálculo por medio del modelo de estimación BC, el cual fue el que presentó mejores resultados. La Tabla 24 muestra los resultados obtenidos para los puntos auxiliares en una serie temporal de 9 años visualizado en un año promedio.

**Tabla 24:**

*Radiación promedio mensual para puntos auxiliares de medición mediante el modelo BC.*

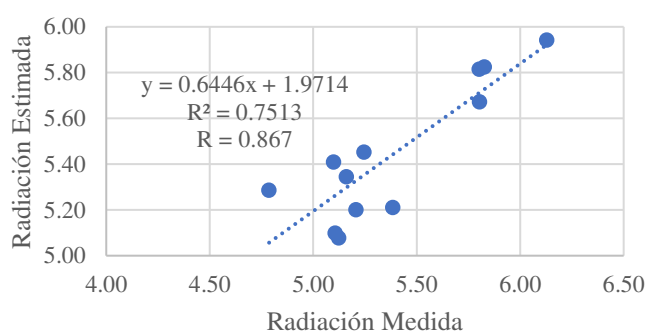
Puntos	Radiación												Anual	Clima frío	Clima cálido
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic			
1	5.17	5.25	5.37	5.32	5.09	5.06	5.16	5.81	5.90	5.81	5.63	5.43	5.28	5.18	5.29
2	5.15	5.26	5.38	5.31	5.09	5.05	5.19	5.81	5.93	5.80	5.64	5.41	5.29	5.20	5.30
3	5.17	5.24	5.37	5.34	5.05	5.05	5.17	5.78	5.93	5.80	5.63	5.43	5.28	5.20	5.30
4	5.15	5.28	5.39	5.30	5.05	5.07	5.18	5.81	5.90	5.79	5.64	5.44	5.26	5.18	5.28
5	5.19	5.26	5.39	5.30	5.09	5.04	5.18	5.80	5.92	5.82	5.62	5.40	5.28	5.20	5.28
6	5.18	5.28	5.37	5.32	5.07	5.04	5.20	5.81	5.89	5.82	5.66	5.43	5.26	5.18	5.29
7	5.18	5.28	5.39	5.30	5.09	5.07	5.19	5.77	5.90	5.79	5.63	5.40	5.28	5.18	5.28
8	5.17	5.27	5.37	5.30	5.08	5.03	5.20	5.76	5.89	5.78	5.63	5.44	5.29	5.18	5.29
9	5.17	5.26	5.36	5.30	5.06	5.03	5.18	5.77	5.90	5.81	5.62	5.40	5.26	5.20	5.29
10	5.17	5.26	5.38	5.31	5.06	5.06	5.17	5.77	5.91	5.78	5.63	5.44	5.26	5.18	5.29
11	5.15	5.26	5.39	5.32	5.09	5.04	5.17	5.78	5.92	5.82	5.65	5.41	5.25	5.20	5.31
12	5.15	5.25	5.36	5.33	5.05	5.06	5.18	5.80	5.89	5.80	5.63	5.43	5.29	5.18	5.31
13	5.17	5.25	5.38	5.31	5.05	5.05	5.20	5.77	5.91	5.81	5.65	5.43	5.28	5.19	5.30
14	5.16	5.26	5.40	5.29	5.07	5.05	5.17	5.79	5.93	5.79	5.66	5.40	5.28	5.18	5.31
15	5.19	5.25	5.37	5.30	5.08	5.07	5.18	5.77	5.89	5.79	5.65	5.43	5.27	5.19	5.31
16	5.16	5.23	5.38	5.29	5.08	5.05	5.19	5.78	5.90	5.80	5.62	5.43	5.25	5.19	5.31

Fuente: Elaboración propia.



El valor obtenido de radiación incidente para cada punto no varía significativamente, por lo que en la Figura 38 de dispersión entre la radiación medida por la EMA y la radiación calculada con valores de NASA dentro del periodo de medición nos permite determinar el grado de correlación existente entre esas dos variables y la calidad del modelo para utilizarlo en los resultados para los puntos auxiliares de medición.

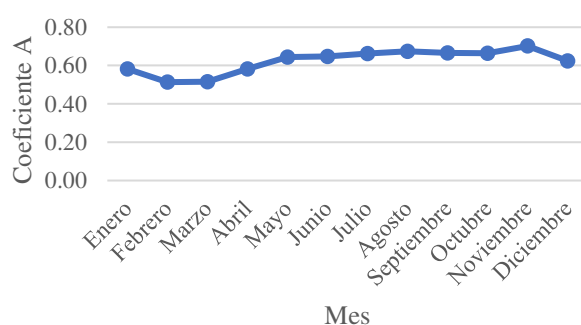
**Figura 38** Correlación entre la radiación mensual registrada y estimada según el modelos BC, para puntos secundarios.



*Fuente: Elaboración propia.*

La representación de la variación diaria de la constante de transmitancia atmosférica máxima se refleja en la Figura 39. Lo que nos indica una interpretación del estado dinámico de la atmósfera para cada día en el periodo promedio extraído de la base de datos de la NASA.

**Figura 39** Variación promedio mensual de la transmitancia atmosférica máxima según modelo BC, para puntos auxiliares.



*Fuente: Elaboración propia.*

### 5.4.1. Validación del Modelo Aplicado.

La Tabla 25 nos muestra el análisis estadístico del modelo de estimación BC para el periodo de registro promedio extraído desde el aplicativo de la NASA, bajo las condiciones del área de estudio.

**Tabla 25:**

*Indicadores estadísticos para la aplicación del Modelo BC, para puntos auxiliares.*

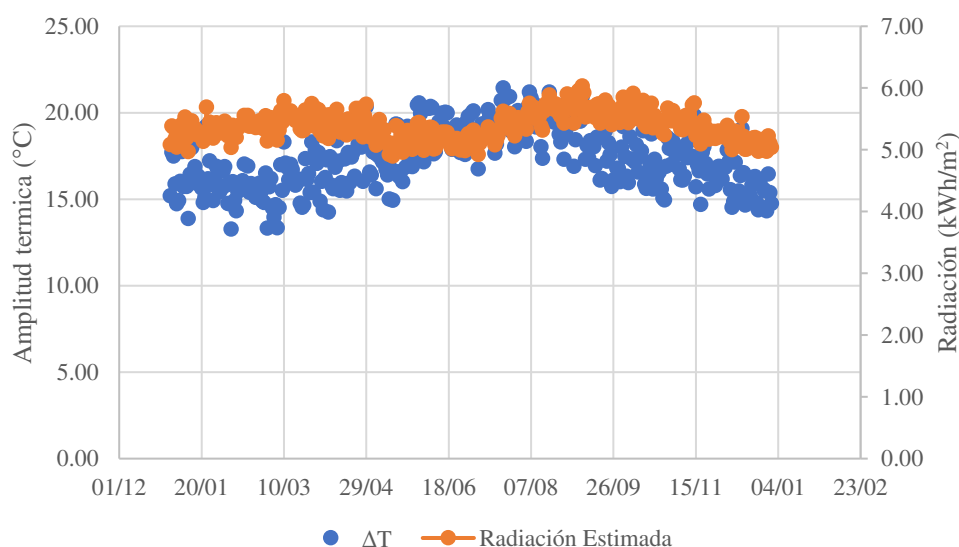
R	R <sup>2</sup>	RMSE	MBE	MABE	MPE	MAPE	% Error
0.867	0.751	0.59	-0.15	0.15	-4.36	4.36	-2.98

Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de correlación resultó 0.866 que significa un grado de fiabilidad bastante aceptable considerando la serie temporal promedio utilizada. Además, se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.749 que valida la calidad del modelo para su aplicación. El error porcentual (-2.98%) aumentó ligeramente a comparación de los datos evaluados mediante la estación meteorológica, sin embargo, se mantiene dentro de los rangos permisibles.

Se puede apreciar en la Figura 40 la relación estrecha entre la radiación solar incidente con la amplitud térmica a lo largo de los datos del año promediado.

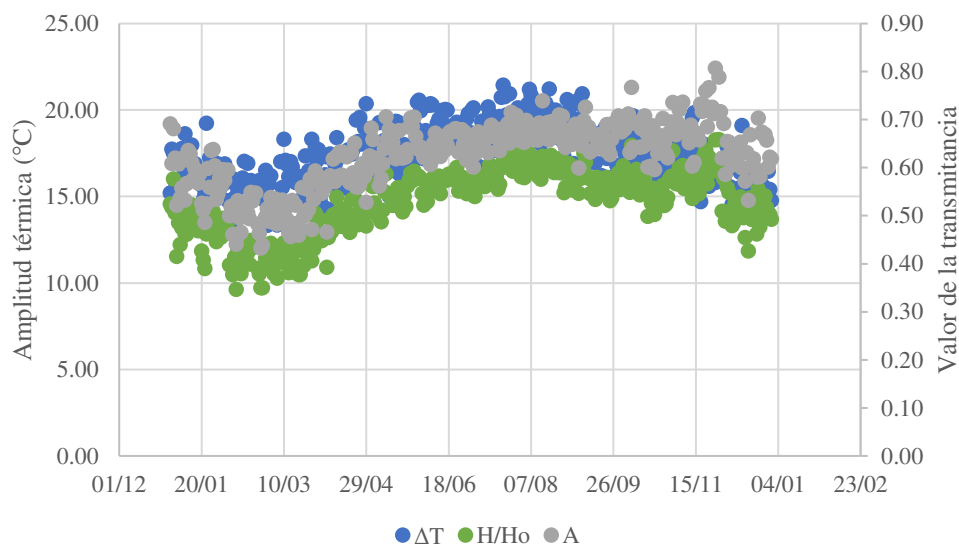
**Figura 40** Relación entre la radiación solar estimada y la amplitud térmica, para puntos auxiliares.



Fuente: Elaboración propia.

De forma similar con respecto a la información expuesta para la estación meteorológica, la Figura 41 representa el grado de relación existente entre los valores de transmitancia con la amplitud térmica.

**Figura 41** Relación entre la amplitud térmica y los valores de transmitancia atmosférica, para puntos auxiliares.



*Fuente: Elaboración propia.*

Los valores menores de temperatura se relacionan a días nublados, mientras que los días mayor claridad o despejados se asocian a temperaturas elevadas.

### 5.5. Distribución Espacial y Temporal de la Radiación Solar Incidente en San Mateo

Se introdujeron los valores resultantes de las series temporales de radiación calculada de cada punto (principal y secundarios) para la simulación. El modelamiento se realizó por interpolación en el software libre QGIS. La cantidad de puntos de registro propició la generación de una malla con recursos suficientes para modelar la radiación en los periodos anual, mensual y estacional.

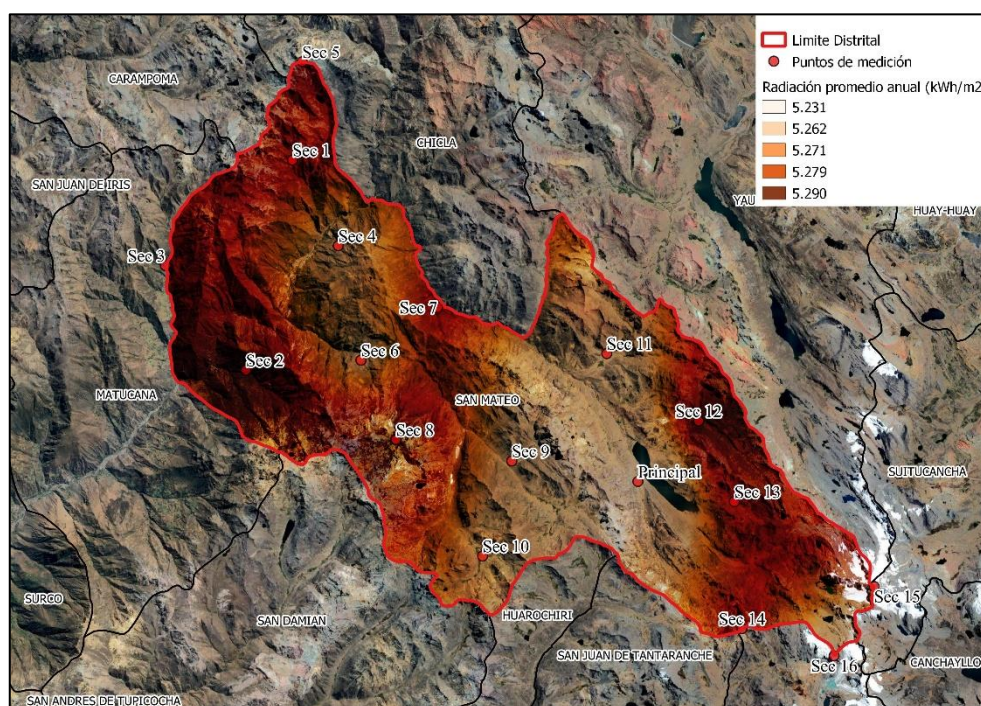
Finalmente obtenemos los mapas digitales donde se aprecia los rangos de la distribución de la radiación incidente con mayor precisión a nivel local (en el área de estudio), considerando los efectos de las variables climáticas y las condiciones de la zona.

### 5.5.1. Distribución anual.

Para efectos de la investigación, la distribución anual presentada se considera como el total del periodo de registro (enero – octubre), promediando los valores de radiación incidente calculados de esos meses para aproximar un año de muestra.

La Figura 42 nos muestra las zonas donde existe mayor y menor variación anual de los valores de radiación solar recibida en la superficie. Se aprecia que la diferencia entre dichas zonas no es muy visible, salvo los puntos de más baja altitud, el resto del territorio posee una distribución de la energía solar bastante homogénea.

*Figura 42 Distribución anual de la radiación solar incidente en San Mateo.*



*Fuente: Elaboración propia.*

Las zonas en las que se registró los valores de disponibilidad de radiación solar diaria se encuentran entre 5.23 a 5.29 kWh/m<sup>2</sup>. Valores que se encuentran dentro del rango estimado para el distrito de San Mateo indicado en el ítem sobre rentabilidad.

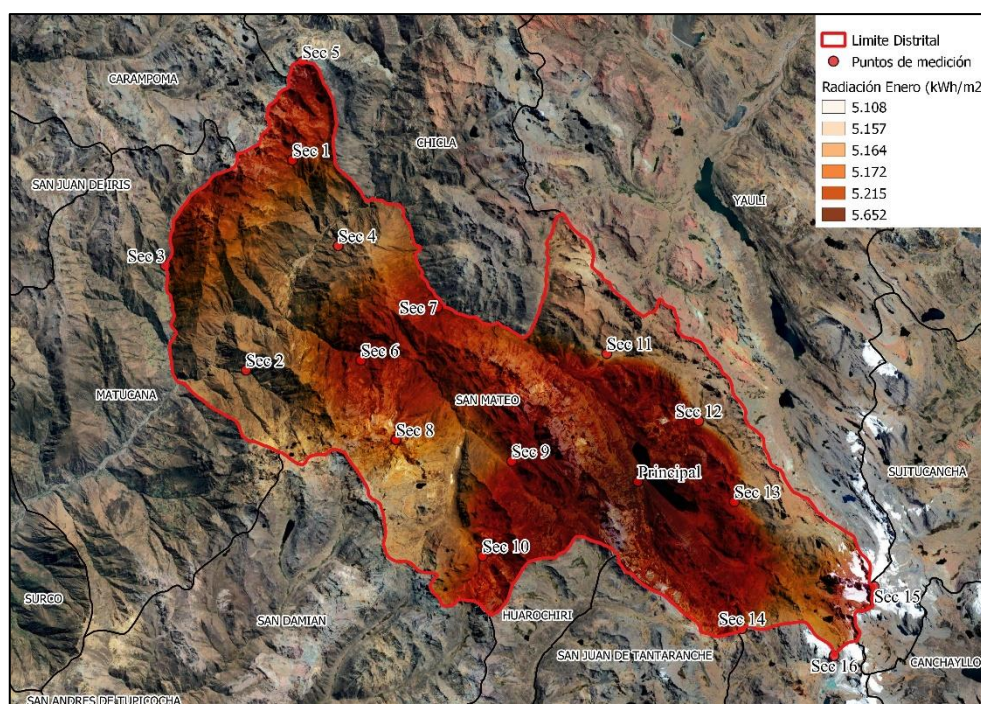


### 5.5.2. Distribución mensual.

Se generó los mapas mensuales para simular el comportamiento de la distribución de la energía solar en cada uno de estos periodos. Atendiendo a la posibilidad de requerir información y/o analizar las condiciones en cada mes.

En la Figura 43, para el mes de enero los valores que se registró de disponibilidad de radiación solar diaria se encuentran entre 5.11 a 5.65 kWh/m<sup>2</sup>.

**Figura 43** Distribución de la radiación solar incidente durante enero.

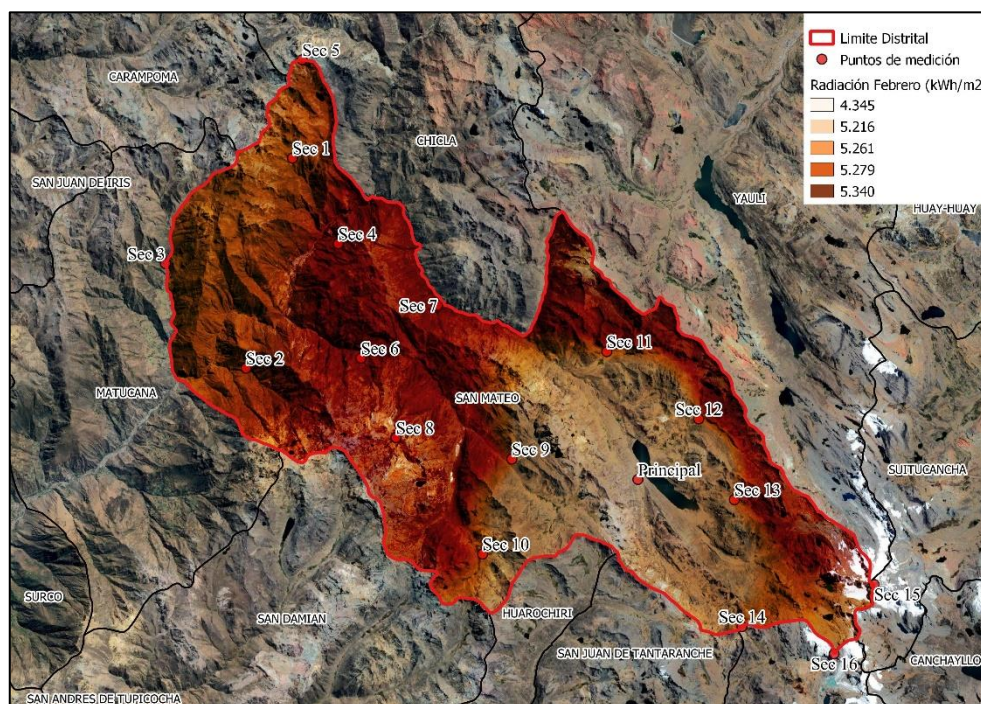


*Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 44, para el mes de febrero los valores que se registró de disponibilidad de radiación solar diaria se encuentran entre 4.35 a 5.34 kWh/m<sup>2</sup>.



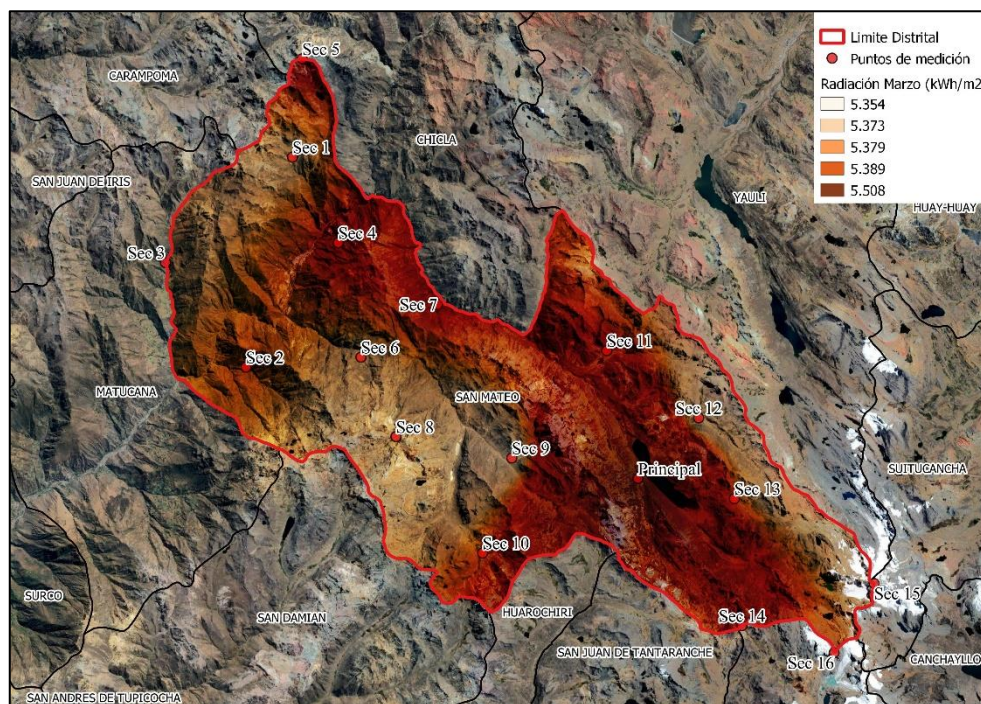
**Figura 44** Distribución de la radiación solar incidente durante febrero.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 45, para el mes de marzo los valores que se registró de disponibilidad de radiación solar diaria se encuentran entre 5.35 a 5.51 kWh/m<sup>2</sup>.

**Figura 45** Distribución de la radiación solar incidente durante marzo.

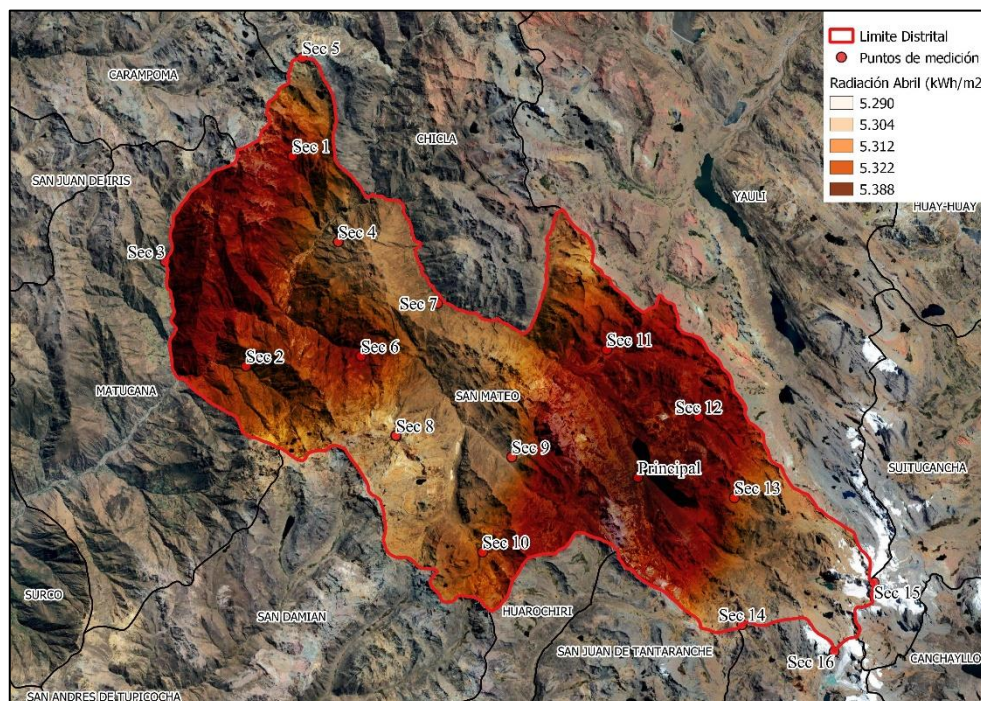


Fuente: Elaboración propia.



En la Figura 46, para el mes de abril los valores que se registró de disponibilidad de radiación solar diaria se encuentran entre 5.29 a 5.39 kWh/m<sup>2</sup>.

**Figura 46** Distribución de la radiación solar incidente durante abril.

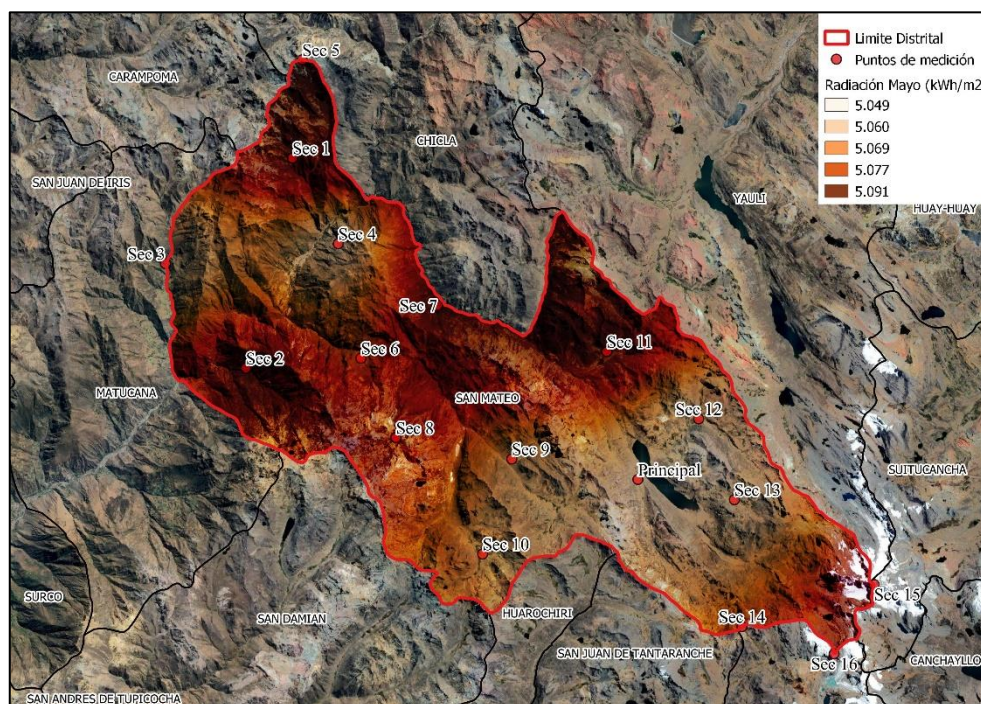


*Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 47, para el mes de mayo los valores que se registró de disponibilidad de radiación solar diaria se encuentran entre 5.05 a 5.09 kWh/m<sup>2</sup>.



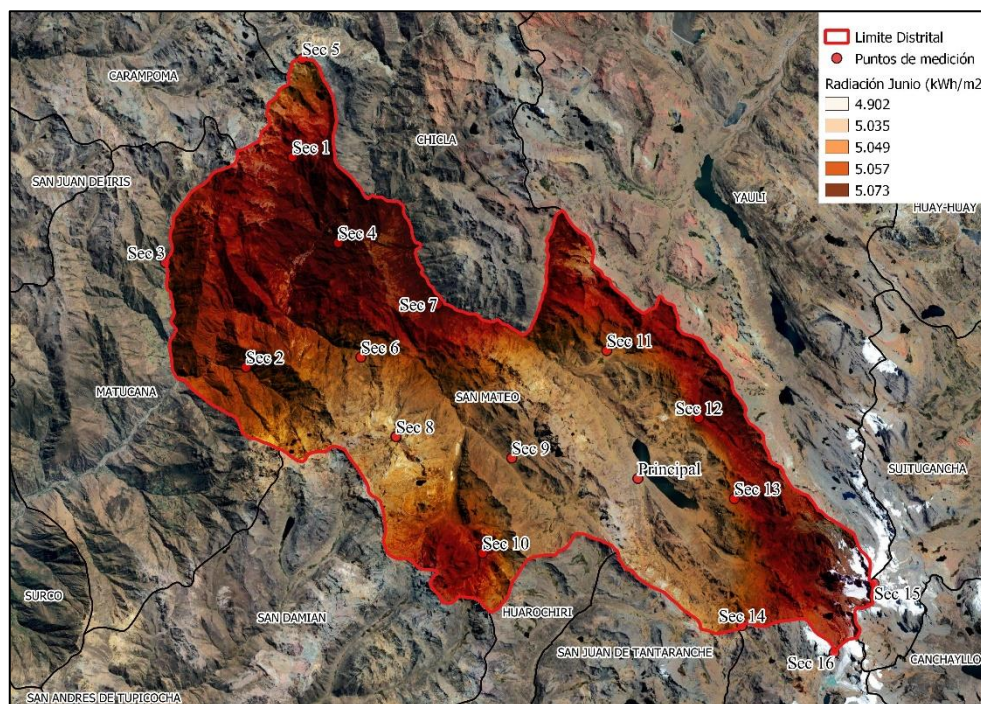
**Figura 47** Distribución de la radiación solar incidente durante mayo.



*Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 48, para el mes de junio los valores que se registró de disponibilidad de radiación solar diaria se encuentran entre 4.90 a 5.07 kWh/m<sup>2</sup>.

**Figura 48** Distribución de la radiación solar incidente durante junio.

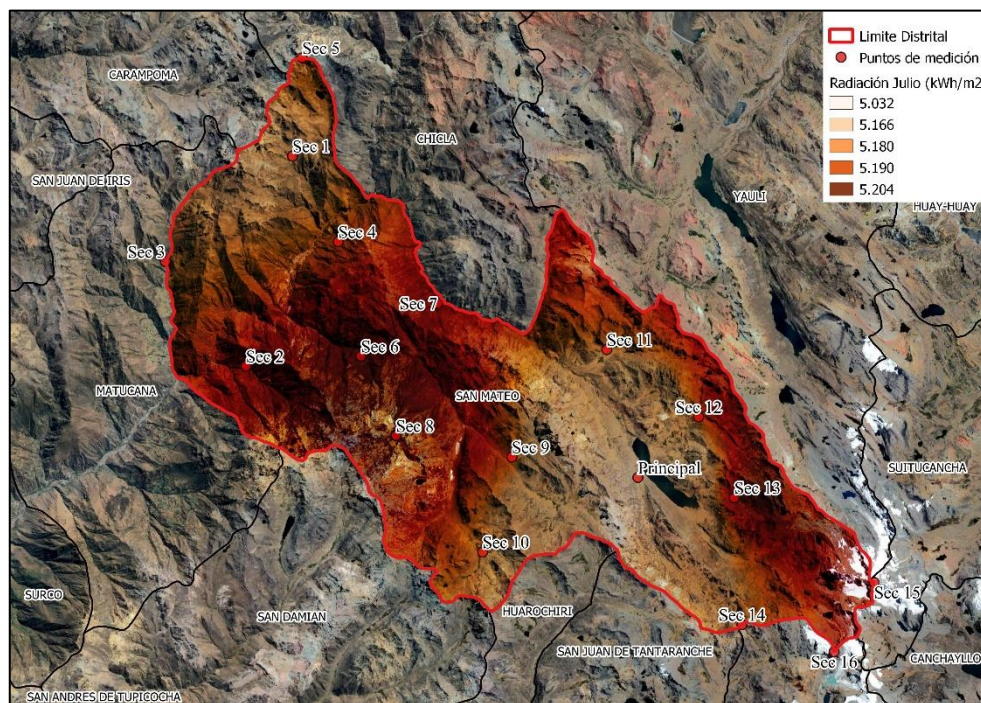


*Fuente: Elaboración propia.*



En la Figura 49, para el mes de julio los valores que se registró de disponibilidad de radiación solar diaria se encuentran entre 5.03 a 5.20 kWh/m<sup>2</sup>.

**Figura 49** Distribución de la radiación solar incidente durante julio.

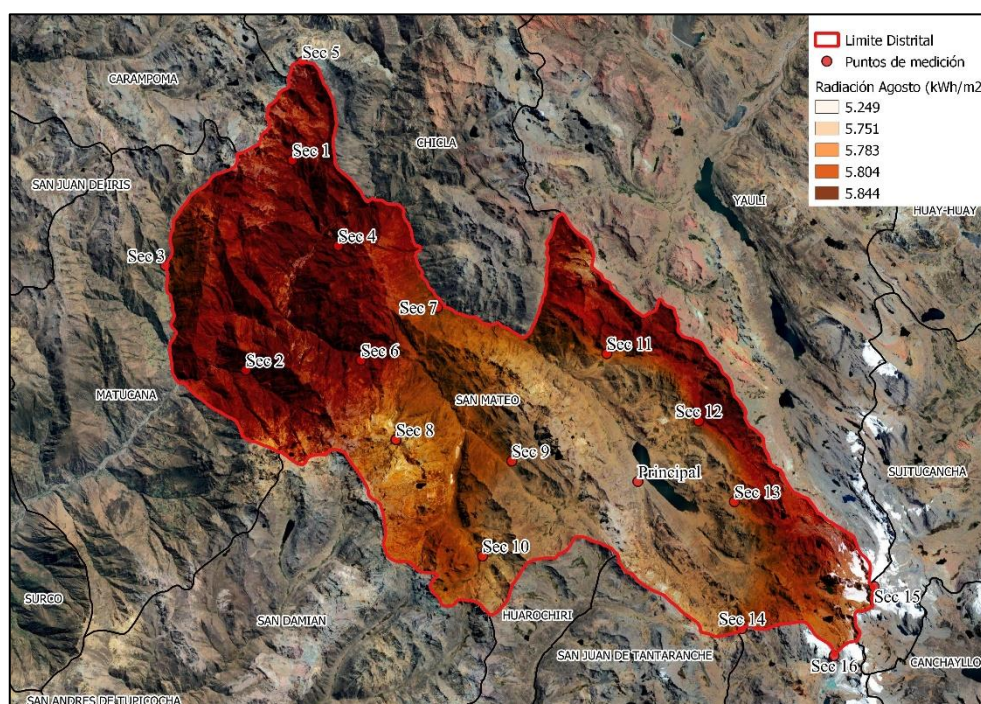


*Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 50, para el mes de agosto los valores que se registró de disponibilidad de radiación solar diaria se encuentran entre 5.25 a 5.84 kWh/m<sup>2</sup>.



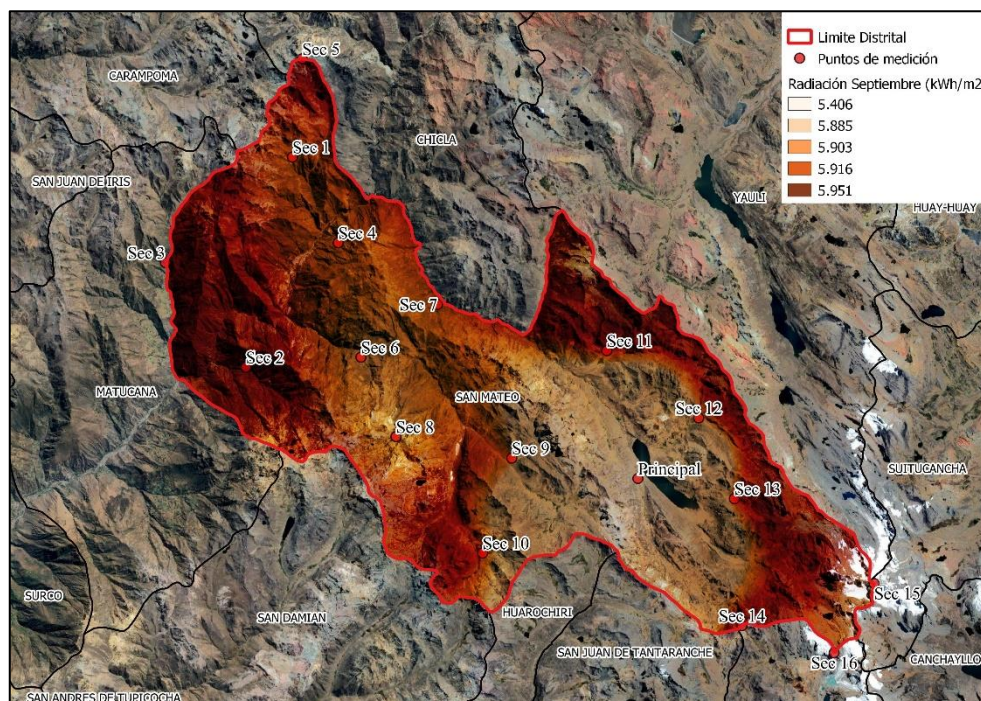
**Figura 50** Distribución de la radiación solar incidente durante agosto.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 51, para el mes de septiembre los valores que se registró de disponibilidad de radiación solar diaria se encuentran entre 5.41 a 5.95 kWh/m².

**Figura 51** Distribución de la radiación solar incidente durante septiembre.

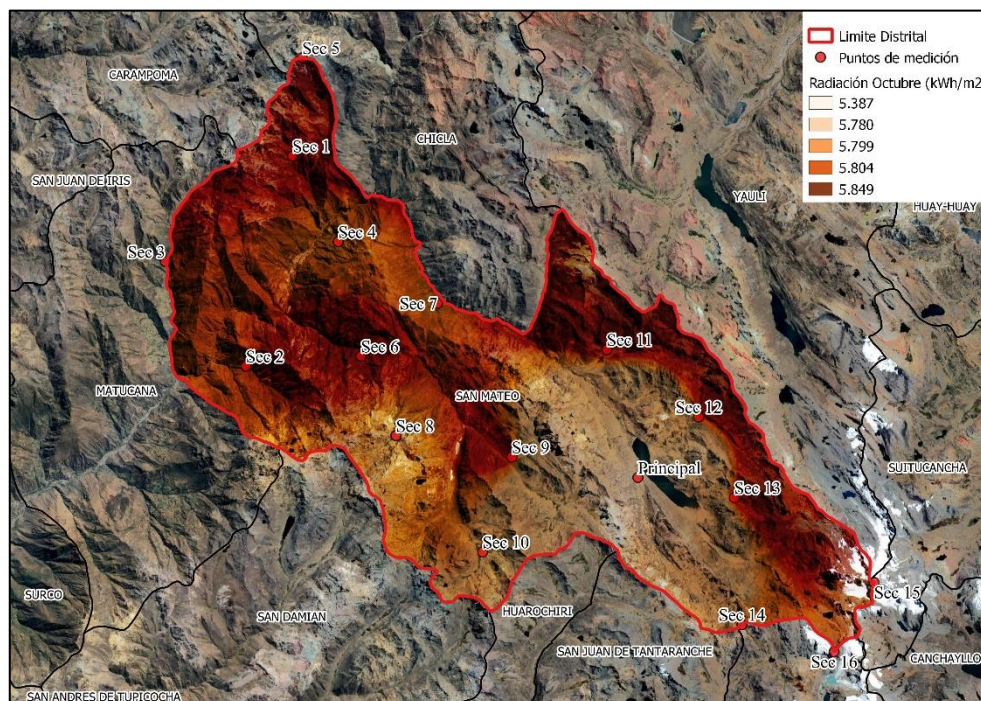


Fuente: Elaboración propia.



En la Figura 52, para el mes de octubre los valores que se registró de disponibilidad de radiación solar diaria se encuentran entre 5.39 a 5.85 kWh/m<sup>2</sup>.

**Figura 52** Distribución de la radiación solar incidente durante octubre.

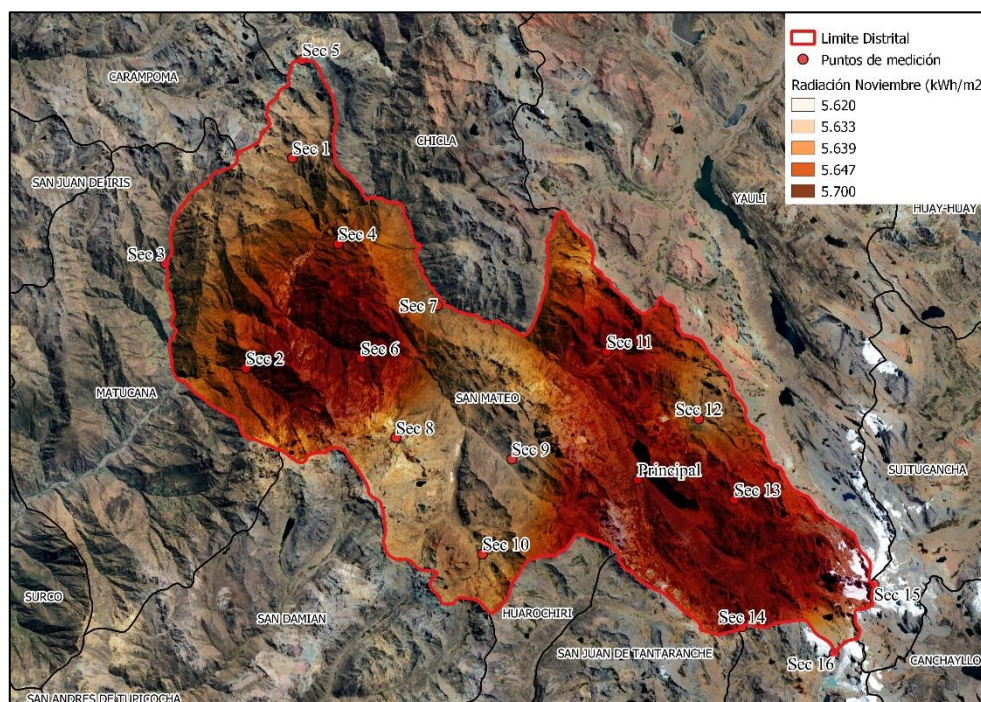


*Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 53, para el mes de noviembre los valores que se registró de disponibilidad de radiación solar diaria se encuentran entre 5.62 a 5.70 kWh/m<sup>2</sup>.



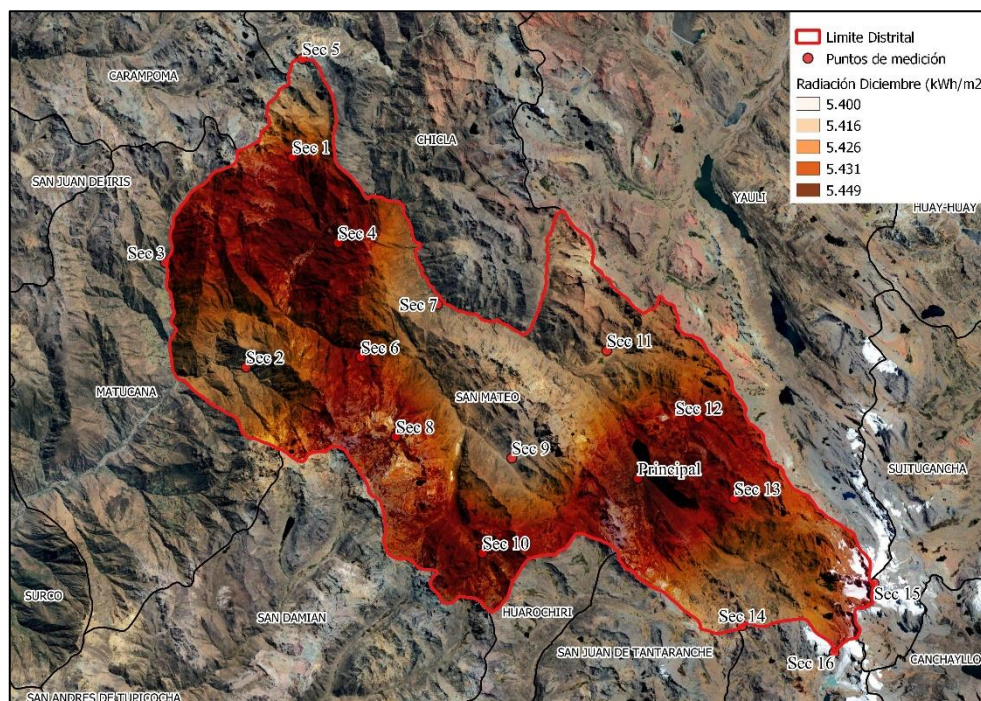
**Figura 53** Distribución de la radiación solar incidente durante noviembre.



*Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 54, para el mes de diciembre los valores que se registró de disponibilidad de radiación solar diaria se encuentran entre 5.40 a 5.45 kWh/m<sup>2</sup>.

**Figura 54** Distribución de la radiación solar incidente durante diciembre.



*Fuente: Elaboración propia.*

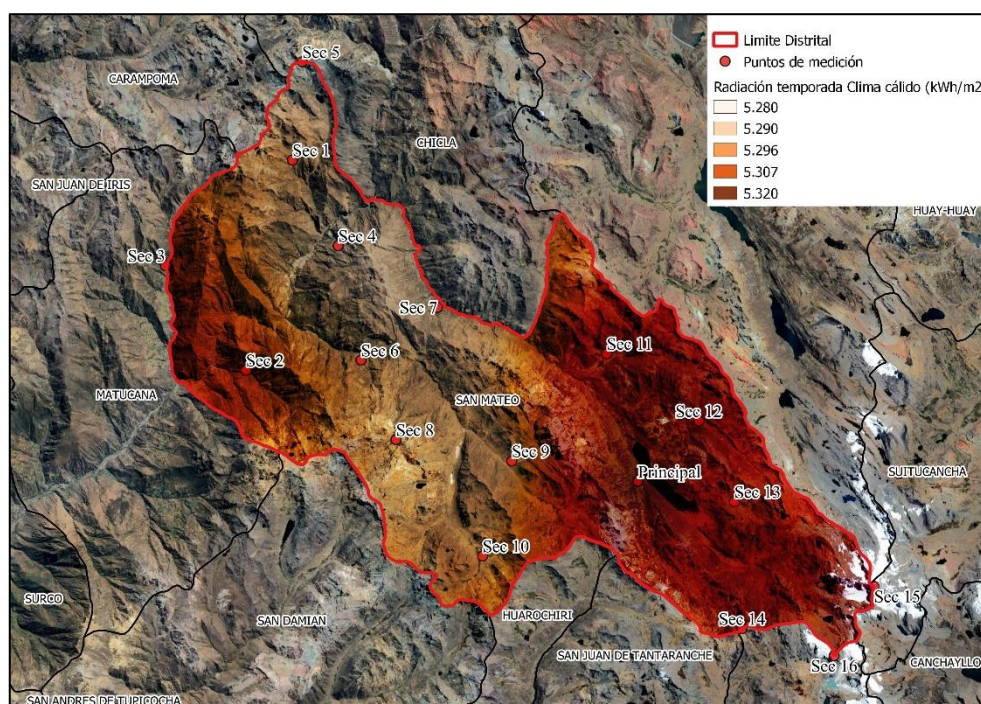


### 5.5.3. Distribución estacional.

Para explicar la distribución de la radiación solar en todo el territorio del distrito de San Mateo debemos considerar las dos temporadas en las cuales el clima posee una característica muy notable. Mencionado anteriormente, San Mateo posee temporadas de un clima cálido y un clima frío, muy aparte de las estaciones regulares que afectan a todo el mundo. Es preciso analizar y mencionar estas temporadas ya que son las de mayor predominio durante el año, y que por lo tanto son las que afectan a la distribución general de la radiación sobre el suelo del distrito.

La Figura 55 nos indica los valores de radiación solar recibida en la superficie para la temporada de clima cálido (diciembre – abril). Los valores que se registró de disponibilidad de radiación solar diaria se encuentran entre 5.28 a 5.32 kWh/m<sup>2</sup>.

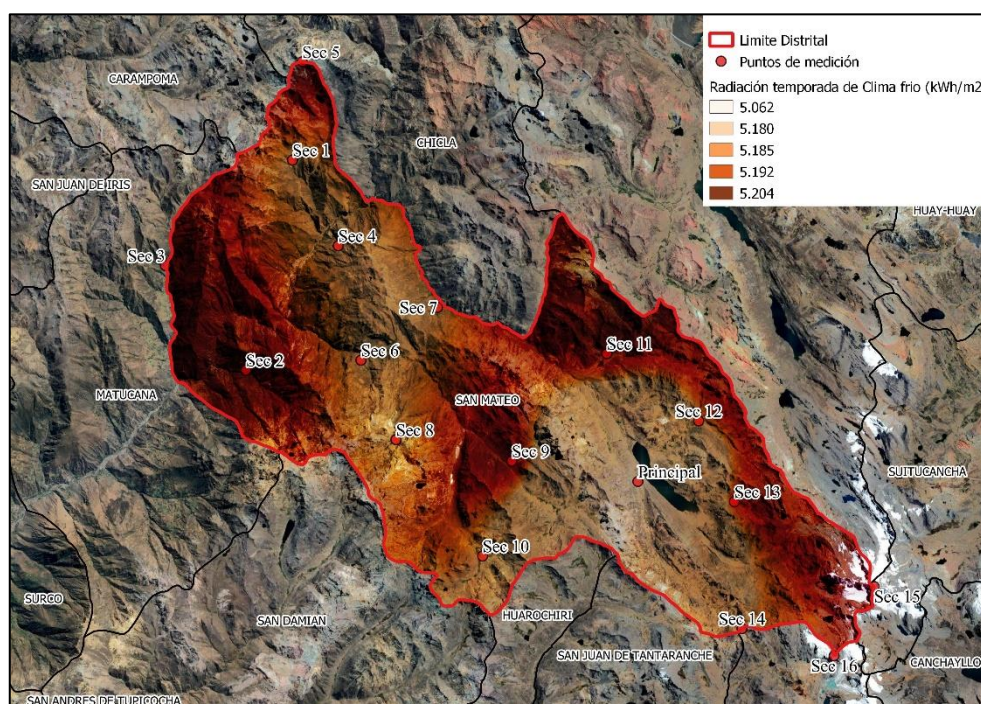
*Figura 55 Distribución de la radiación solar incidente en temporada de clima cálido.*



*Fuente: Elaboración propia.*

La Figura 56 nos indica los valores de radiación solar recibida en la superficie para la temporada de clima frío (junio – septiembre). Los valores que se registró de disponibilidad de radiación diaria se encuentran entre 5.06 a 5.20 kWh/m<sup>2</sup>.

**Figura 56** Distribución de la radiación solar incidente en temporada de clima frío.



Fuente: Elaboración propia.

## Capítulo 6: Conclusiones

### 6.1. Conclusión General

- Con los datos procesados de las temperaturas máximas y mínimas en los modelos de estimación, se determinó el comportamiento de la radiación solar incidente en el área de estudio, además de conocer el efecto que conlleva la variación de dichos parámetros en cualquier momento añadiendo simplemente la latitud del lugar.
- Realizando la simulación se pudo verificar que la relación entre la diferencia de las temperaturas máximas y mínimas, es decir la amplitud térmica, depende de la radiación solar que ingresa diariamente en el alba y la que se pierde por las noches generalmente hasta antes del amanecer. Lo que nos permite utilizar los modelos estadísticos de estimación para determinar el potencial solar mediante parámetros climáticos de simple registro como la temperatura.
- Con el resultado de esta investigación es posible aplicar la metodología utilizada para la determinación del potencial solar a nivel local, verificando siempre las condiciones del área de estudio.

### 6.2. Conclusiones Específicas

- El efecto de la transmitancia atmosférica se determinó relacionando las radiaciones medidas y calculadas en el área de estudio, de manera que la correlación entre ambas variables nos brinda una constante de transmitancia atmosférica máxima de 0.6741, que evita la parametrización del efecto radiativo de la nube, y que por consiguiente se muestra como un indicador de nubosidad para cada día del año que se desee calcular.
- Los modelos de estimación BC, HS y ANN, basados en la amplitud térmica dieron resultados aceptables, siendo el más destacado el modelo de estimación BC y el que

mejor se adaptó a las condiciones climáticas y topográficas del área de estudio. Obteniéndose un valor de radiación solar anual disponible de 5.23 a 5.29 kWh/m<sup>2</sup>. En ese sentido podemos afirmar que la utilización de este tipo de modelos para la determinación del potencial solar en zonas donde no se cuenta con registro se presentan como una buena alternativa, pero sobre todo viable. La elección de estos modelos recae en la facilidad de su aplicación, variables de entrada accesibles requeridas para su ejecución y la inclusión de una constante que engloba aproximadamente las características de la transmitancia atmosférica.



## **Capítulo 7: Recomendaciones**

- Al tratarse de una zona de alta montaña, los valores registrados que se utilizaron como parámetros de entrada no se recomiendan para el análisis de zonas homogéneas ya que las condiciones varían sensiblemente para cada región o distrito.
- De extraer información de la base de datos de la NASA, esta debe ser validada con la obtenida en tierra, de manera que sea confiable y apta para su aplicación en los modelos de estimación.

## Capítulo 8: Referencias Bibliográficas

- Adamala, S., & Krishna Reddy, Y. V. (2019). Evaluation of Different Solar Radiation Estimation Methods for Indian Locations. En M. Rathinasamy, S. Chandramouli, K. Phanindra, & U. Mahesh, *Water Resources and Environmental Engineering II Climate and Environment* (págs. 47-56). doi:[https://doi.org/10.1007/978-981-13-2038-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2038-5_5)
- Almorox, J., Bocco, M., & Willington, E. (2013). Estimation of daily global solar radiation from measured temperatures at Cañada de Luque, Córdoba, Argentina. *Renewable Energy*, 382-387.
- Annandale, J. J., Benadé, N., & Allen, R. (2002). *Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration* (Vol. 21(2)). Irrigation Science. doi:[10.1007/s002710100047](https://doi.org/10.1007/s002710100047)
- Arias Odón, F. G. (2006). *El Proyecto de Investigación* (Sexta ed.). Episteme.
- Baigorria, G. A., & Bowen, W. T. (2001). A process-based model for spatial interpolation of extreme temperatures and solar radiation. En G. A. Baigorria Paz, *Climate Interpolation for Land Resource and Land use Studies in Mountainous Regions* (págs. 31-45).
- Baigorria, G. A., Villegas, E. B., Trebejo, I., Carlos, J. F., & Quiroz, R. (2004). Atmospheric Transmissivity: Distribution and Empirical Estimation Around the Central Andes. *International Journal of Climatology*, 1121-1136. doi:[10.1002/joc.1060](https://doi.org/10.1002/joc.1060)
- Bandyopadhyay, A., Bhadra, A., Raghuwanshi, N., & Singh, R. (2008). Estimation of monthly solar radiation from measured air temperature extremes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1707-1718.
- Bayazitoglu, Y. (1987). Availability of Solar Energy. En H. Yüncü, & E. Paykoc, (eds) *Solar Energy Utilization. NATO ASI Series (Series E: Applied Sciences)* (Vol. 129, págs. 45-68). Springer, Dordrecht. doi:[https://doi.org/10.1007/978-94-009-3631-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-009-3631-7_4)
- Benford, F., & Bock, J. E. (1939). A Time Analysis of Sunshine. *Trans. Am. Illumin. Eng. Soc.*, 200.
- Burrough, P. A., McDonnell, R. A., & Lloyd, C. D. (2015). *Principles of Geographical Information Systems* (Third Edition ed.). Oxford.
- Camayo Lapa, B. F., Massipe Hernández, J. R., Pomachagua Paucar, J. E., Torres Ten, A., & Quispe Flores, M. O. (2015). Desarrollo del modelo bristow campbell para estimar la radiación solar global de la región de junin, Perú. *Revista Tecnológica Química*, 220-234.

- Chen, J. L., & Li, G. S. (2012). Parameterization and Mapping of Solar Radiation in Data Sparse Regions. *Asia-Pacific Journal of the Atmospheric Sciences*, 423-431. doi:10.1007/s13143-012-0038-y
- Cooper, P. I. (1969). The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills. *Solar Energy*, 333-346. doi:https://doi.org/10.1016/0038-092X(69)90047-4
- Corrales P., M., & Villegas Z., V. (2013). Determinación de la cantidad de radiación solar incidente en paramentos verticales en W/m<sup>2</sup>h°C en diferentes direcciones a partir de la radiación horizontal incidente en la ciudad de Huaraz — Perú. *Aporte Santiaguino*, 43-53.
- DAVIS. (2019). *DAVIS Instruments*. Obtenido de <https://www.davisinstruments.com/>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes, Fourth Edition*. WILEY & SONS.
- Espinoza Montes, C. (2010). *Metodología de investigación tecnológica, pensando en sistemas* (Primera ed.). (C. E. Montes, Ed.) Huancayo: Grafica SAC.
- Gastelo Roque, J. A., & Morales Acevedo, A. (2017). Estimación de la radiación solar diaria utilizando el modelo de Hargreaves-Samani. *Conference: Proceedings XLI Semana Nacional de Energía Solar*.
- Gastelo Roque, J. A., Morales Acevedo, A., & Tineo Soto, J. E. (2017). Estimación de la radiación solar diaria y ángulos de inclinación óptimos para Lambayeque (Perú) utilizando el modelo Hargreaves-Samani. *Ciencia, Tecnología y Humanidades*, 8.
- Gavilán, P. (2010). *Modelos de estimación de la radiación solar diaria a partir de medidas de la temperatura*.
- Hargreaves, G. H. (1994). Simplified Coefficients for Estimating Monthly Solar Radiation in North America and Europe. *Dept. Biol. And Irrig. Engrg*.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1982). *Estimating Potential Evapotranspiration, Journal of the Irrigation and Drainage Division* (Vol. 108). Utah, USA: American Society of Civil Engineers, ASCE Library.
- Hernández Sampietri, R. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta ed.). México: McGraw Hill.
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Toronto: Academic Press.
- Li, H., Cao, F., Bu, X., & Zhao, L. (2015). Models for calculating daily global solar radiation from air temperature in humid regions - A case study. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 34, 595-599.
- López, G., Rubio, M. A., & Batlles, F. J. (2000). Estimation of hourly direct normal from measured global solar irradiance in Spain. *Renewable Energy*, 175-186.

- Luque, A., & Hegedus, S. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Spain-USA: John Wiley & Sons.
- Martín, A. M., & Dominguez, J. (2019). Solar Radiation Interpolation. En J. Polo, L. Martin-Pomares, & A. Sanfilippo, *Solar Resources Mapping: Fundamentals and Applications* (págs. 221-243).
- Meizoso Lopez, C. (2012). *Distribución de la irradiación solar global, directa y difusa, en la ciudad de A. Coruña*. España.
- Meza, F., & Varas, E. (2000). Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. *Agricultural and Forest Metereology*, 231-241.
- Ministerio de Energia y Minas, & SENAMHI. (2003). *Atlas de energia solar del Perú*. Perú: Proyecto PER/98/G31: Electrificación rural a base de energia fotovoltaica en el Perú.
- Ministerio del Ambiente, & SENAMHI. (2013). *Protocolo para la instalación y operación de estaciones meteorológicas, agrometeorológicas e hidrológicas*. Perú.
- Mudasiru, M., & Mustafa, M. W. (2019). Estimation of Global Solar Radiation on Horizontal Surface in Kano, Nigeria Using Air Temperature Amplitude. *International Journal of Integrated Engineering*, 103-109. doi:<https://doi.org/10.30880/ijie.2019.11.06.011>
- NASA. (2003). *The POWER Project*. Obtenido de <https://power.larc.nasa.gov/>
- NASA. (2019). *MERRA-2 Modern-Era Retrospective Analysis*. Obtenido de Global Modeling and Assimilation Office: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>
- OMM. (1996). *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos (Guia N°8)* (Sexta ed.). Suiza.
- Perez, R., David, M., Hoff, T. E., Jamaly, M., Kivalov, S., Kleissl, J., . . . Perez, M. (2016). *Spatial and Temporal Variability of Solar Energy*. Foundations and Trends in Renewable Energy. doi:10.1561/27000000006
- Prieto, J. I. (2016). *Disponibilidad de la Energia Solar (Solar Energy Availability)*. España: Universidad de Oviedo.
- Quej, V. H., Almorox, J., Ibrakhimov, M., & Saito, L. (2016). Empirical models for estimating daily global solar radiation in Yucatán Peninsula, Mexico. *Energy Conversion and Management*, 448-456.
- Quispe Huamán, L. (2018). *Determinacion y Analisis Espacio Temporal de la Radiacion Solar Global en el Altiplano de Puno*.
- Rojas Pisco, G., & Flores, G. J. (2015). *Evaluación del software (SISA) para simular la irradiación solar en la Amazonía Peruana (Estaciones Metereológicas Experimentales de Iquitos, Nauta y Tamshiyacu) 2014*.

- Soteris A., K. (2014). *Solar Energy Engineering, Processes and Systems, Second Edition*. ELSEVIER.
- Torrez, R., Burgoa, A., & Ricaldi, E. (2013). Modelos de estimacion de la radiacion solar para el altiplano central de Bolivia. *Revista Boliviana de Física*, 1-7.
- Vásquez, J. W., & Lloyd, P. (1987). Estimación de Energía Solar en Perú. *Revista Energética (Energy Magazine) - OLADE(1)*, 43-63.
- Yogi Goswami, D. (2015). *Principles of Solar Engineering, Third Edition*. CRC Press.
- Yousif, C., Oña Quecedo, G., & Bilbao Santos, J. (2013). Comparison of solar radiation in Marsaxlokk, Malta and Valladolid, Spain. *Renewable Energy*, 49, 203-206.

## Capítulo 9: Anexos

### Anexo 1: Metodología del cálculo

El procedimiento a continuación está constituido por la utilización de las ecuaciones mencionadas en el marco teórico en el siguiente orden para la obtención de los parámetros de irradiación solar para cada método de estimación empleado.

**1° Día Juliano:** De Tabla 1.

**2° Latitud:** De las coordenadas de ubicación en grados del área de estudio.

**3° Factor de corrección:** De la ecuación (2.2):

$$\varepsilon = (r_0/r)^2 = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{360(d_n)}{365}\right)$$

**4° Declinación:** De la ecuación (2.3):

$$\delta = 23.45^\circ * \sin\left[\frac{360(d_n + 284)}{365}\right]$$

**5° Angulo de salida del sol:** De la ecuación (2.4):

$$\omega_s = -\cos^{-1}(\tan \delta * \tan \varphi)$$

**6° Radiación extraterrestre:** De la ecuación (2.12):

$$H_0 = \frac{24 * 3600 * G_{sc}}{\pi} * \varepsilon * (\cos \varphi * \cos \delta * \cos \omega_s + \frac{\pi * \omega_s}{180} * \sin \varphi * \sin \delta)$$

**7° Aplicación Modelo de estimación I, Bristow-Campbell:** De las ecuaciones (2.14), (2.15) y (2.16):

$$\frac{H}{H_0} = a_B * [1 - e^{(-b_B * \Delta T^{c_B})}]$$

$$c_B = 2.116 - 0.072 (T_{max} - T_{min}) + 57.574 * e^\varphi$$

$$b_B = 0.107 * c_B^{-2.6485}$$

**8° Aplicación Modelo de estimación II, Hargreaves-Samani:** De la ecuación (2.17):

$$\frac{H}{H_0} = a * (T_{max} - T_{min})^{0.5}$$

**9° Aplicación Modelo de estimación III, Annandale:** De la ecuación (2.18):

$$\frac{H}{H_0} = A * (1 + 2.7 * 10^{-5} * Z)(T_{max} - T_{min})^{0.5}$$

## Anexo 2: Glosario de términos

**Amplitud térmica:** Diferencia entre los valores máximos y mínimos de la temperatura observados en un punto durante un periodo de tiempo determinado.

**Calor latente:** Energía responsable del cambio de fase, impulsor primario para la circulación atmosférica.

**Calor sensible:** Energía responsable de las temperaturas máximas del aire que depende de la radiación entrante diaria.

**Constante solar:** Es la energía del sol por unidad de tiempo recibida en una unidad de área de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación a una distancia media entre la Tierra y el Sol fuera de la atmósfera.

**Cuerpo negro:** Temperatura que irradia la misma cantidad de energía que el sol.

**Dispersión de Rayleigh:** Es la dispersión de la radiación por moléculas de aire como nitrógeno, oxígeno y otros componentes, en longitudes de onda muy cortas comparables al tamaño de las moléculas.

**Efecto radiativo:** Consecuencia en el flujo de radiación causado por la interacción de elementos mediante absorción y dispersión.

**Espectro electromagnético:** Conjunto de longitudes de onda de las radiaciones electromagnéticas. Las longitudes de onda de importancia en la energía solar y sus aplicaciones están en el rango de ultravioleta a infrarrojo.

**Índice de claridad:** Su interpretación física se refiere al grado de claridad del cielo.

**Insolación:** Es la irradiación de energía solar en un tiempo promedio determinado de permanencia sobre una superficie.

**Irradiación:** Es la energía solar incidente por unidad de área en una superficie, esta se calcula mediante la integración de la irradiación en un tiempo específico, generalmente una hora o un día ( $\text{Wh/m}^2$ ).



**Irradiancia:** La velocidad a la que la energía radiante incide en una superficie por unidad de área de superficie ( $\text{W/m}^2$ ).

**Serie temporal:** Registro de valores de una variable observados en una secuencia a lo largo del tiempo, ordenados cronológicamente en intervalos regulares. Se utilizan para estudiar una relación causal entre distintas variables que se influyen entre sí y se modifican con el tiempo.

**Transmitancia atmosférica:** Atenuación de la radiación solar causada por la interacción con partículas a través de la atmosfera.

**Unidad astronómica:** Unidad de longitud que equivale aproximadamente a la distancia media entre la Tierra y el Sol.

### Anexo 3: Matriz de consistencia

**Tabla 26**

*Matriz de consistencia de la tesis*

“ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL SOLAR MEDIANTE MODELOS BASADOS EN PARÁMETROS CLIMÁTICOS PARA EL DISTRITO DE SAN MATEO, PROVINCIA DE HUARACHIRI, LIMA - PERÚ”						
Problemas	Objetivos	Justificación e Importancia	Hipótesis	Variables e Indicadores	Tipo y Diseño	Población y Muestra
<p><b>Problema Principal</b></p> <p>¿Cuáles son los efectos de los parámetros climáticos para la estimación del potencial solar disponible en el área de estudio?</p> <p><b>Problemas Específicos</b></p> <p>¿Cuál es el efecto de la atenuación atmosférica para determinar el potencial solar disponible en el área de estudio?</p> <p>¿Cuáles son las características de funcionamiento de modelos de estimación de radiación solar convenientes ante la variabilidad topográfica y climática?</p>	<p><b>Objetivo General</b></p> <p>Determinar los efectos de los parámetros climáticos que permitan estimar el potencial solar disponible en el área de estudio.</p> <p><b>Objetivos específicos</b></p> <p>Estimar el efecto de la atenuación atmosférica que influye en la determinación de la radiación solar en el área de estudio.</p> <p>Determinar las características de funcionamiento de modelos de estimación de radiación solar convenientes ante la variabilidad topográfica y climática.</p>	<p><b>Justificación</b></p> <p>Esta investigación analiza la importancia del conocimiento de la disponibilidad de energía solar como alternativa de uso para fines productivos que favorezcan el crecimiento de las comunidades en el área de estudio.</p> <p>La realización del estudio propone disponer del valor de la variable asociada al comportamiento de la dinámica atmosférica, para la caracterización de la atmósfera y conocer su variación temporal. En consecuencia, obtener la transmitancia atmosférica para cada día del año.</p> <p>La aplicación de modelos de estimación de radiación solar convenientes permitirá determinar importante información de disponibilidad de potencial solar donde no se cuente con registro completo o adecuado en toda la superficie que involucra al área de estudio.</p>	<p><b>Hipótesis General</b></p> <p>Los efectos de los parámetros climáticos propician el uso de modelos convenientes de estimación de radiación solar que permiten determinar el potencial solar en el área de estudio.</p>	<p><b>V. Dependiente</b></p> <p>Radiación Solar</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilidad en el área de estudio.</li> </ul> <p><b>V. Independiente</b></p> <p>Temperatura.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperaturas máximas y mínimas.</li> </ul> <p><b>Indicadores</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura máxima</li> <li>• Temperatura mínima</li> <li>• Latitud</li> <li>• Día del año</li> </ul>	<p><b>Tipo de Investigación:</b></p> <p>Cuantitativa.</p> <p><b>Nivel de la investigación:</b></p> <p>Descriptivo y Correlacional.</p> <p><b>Diseño de la investigación:</b></p> <p>No experimental y Longitudinal.</p> <p><b>Técnica de recolección de datos:</b></p> <p>Instrumental.</p> <p><b>Técnica de análisis de datos:</b></p> <p>Estadística descriptiva.</p>	<p><b>Población:</b></p> <p>Registro de estación meteorológica y data extraída de POWER (aplicativo NASA).</p> <p><b>Muestra:</b></p> <p>Registro promedio diario durante mayor exposición solar.</p>

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4: Plano de Ubicación

